

**INCIDENCIA A NIVEL FÍSICO DE LA TÉCNICA DE MODULACIÓN M-QAM SOBRE UN
MÓDULO RoF EN UNA RED FTTH-GPON**



**JULIAN ANDRÉS DUYSOVIC GARCÍA
ERNESTO CAMILO UNIGARRO SANTACRUZ**

**Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Popayán, Cauca
2021**

**INCIDENCIA A NIVEL FÍSICO DE LA TÉCNICA DE MODULACIÓN M-QAM SOBRE UN
MÓDULO RoF EN UNA RED FTTH-GPON**



**JULIAN ANDRÉS DUYMOVIC GARCÍA
ERNESTO CAMILO UNIGARRO SANTACRUZ**

Trabajo de Grado para optar al título de:

INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

Director:

PhD. José Giovanni López Perafán

**Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Popayán, Cauca
2021**

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: MARCO CONCEPTUAL.....	4
1.1 SISTEMAS FTTH-GPON <i>TRIPLE PLAY</i>	4
1.1.1 TECNOLOGÍA FTTx.....	4
1.1.2 REDES ÓPTICAS PASIVAS	8
1.1.3 SERVICIOS TRIPLE PLAY	11
1.2 SISTEMAS RoF	13
1.2.1 ARQUITECTURA DE UN SISTEMA RoF	14
1.2.2. PROCESO ELÉCTRICO EN UN SISTEMA RoF	18
1.2.3 PROCESO ÓPTICO EN UN SISTEMA RoF	21
1.3 MODULACIÓN M-ARIA EN AMPLITUD Y CUADRATURA.....	26
1.3.1 SISTEMAS M-QAM	27
1.3.2 PROBABILIDAD DE ERROR DE SÍMBOLO.....	33
CAPÍTULO II: METODOLOGÍA DE DESARROLLO Y SIMULACIÓN.....	36
2.1 FASE INICIAL.....	37
2.1.1 ESCENARIOS DE SIMULACIÓN	37
2.1.2 HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN	37
2.1.3 PARÁMETROS DE EVALUACIÓN DEL SISTEMA.....	39
2.2 FASE DE REQUERIMIENTO Y DISEÑO	42
2.2.1 MODELO CONCEPTUAL DE LA RED FTTH-GPON <i>TRIPLE PLAY</i>	43
2.2.2 MODELO CONCEPTUAL DEL SISTEMA RoF	46
2.2.3 MODELO CONCEPTUAL DE LA RED FTTH-GPON <i>QUAD PLAY</i>	50
2.3 FASE DE DESARROLLO	52
2.3.1 MODELO FÍSICO DE LA RED FTTH-GPON <i>TRIPLE PLAY</i>	52
2.3.2 MODELO FÍSICO DE RED DEL MÓDULO RoF.....	53
2.3.3 MODELO FÍSICO DE LA RED FTTH-GPON <i>QUAD PLAY</i>	54
CAPÍTULO III: PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	56
3.1 SISTEMA FTTH-GPON <i>TRIPLE PLAY</i>	56
3.1.1 ANÁLISIS DE LAS GRÁFICAS DE LA SEÑAL DE INFORMACIÓN EN DIFERENTES ETAPAS DEL SISTEMA	56
3.1.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS RESPECTO A LOS PARÁMETROS DE EVALUACIÓN DEL SISTEMA.....	61
3.2 SISTEMA RoF DE INTERNET MÓVIL.....	64

3.2.1 PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL SISTEMA RoF PARA UNA TOPOLOGÍA PUNTO A PUNTO	66
3.2.2 PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL SISTEMA RoF PARA UNA TOPOLOGÍA PUNTO A MULTIPUNTO	88
3.3 SISTEMA FTTH-GPON <i>QUAD PLAY</i>	95
3.3.1 PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS PARA 1 ONT	96
3.3.2 PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS PARA VARIAS ONTs	104
3.4 SÍNTESIS DE RESULTADOS	109
3.4.1 SERVICIOS <i>TRIPLE PLAY</i>	110
3.4.2. SERVICIO DE INTERNET MÓVIL	112
CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS	115
4.1 CONCLUSIONES	115
4.1.1 RESPECTO A LOS RESULTADOS OBTENIDOS	115
4.1.2 RESPECTO A LA HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN	118
4.2 RECOMENDACIONES	118
4.3 TRABAJOS FUTUROS	119
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	121

Lista de Acrónimos

3GPP	: <i>3rd Generation Partnership Project</i> , Proyecto Asociación de 3ra Generación.
4G	: <i>4th Mobile Phone Generation</i> , 4ta Generación de Telefonía Móvil.
5G	: <i>5th Mobile Phone Generation</i> , 5ta Generación de Telefonía Móvil.
ADSL	: <i>Asymmetric Digital Subscriber Line</i> , Línea de Abonado Digital Asimétrica.
AON	: <i>Active Optical Network</i> , Red Óptica Activa.
APON	: <i>Asynchronous Transfer Mode Passive Optical Network</i> , Red Óptica Pasiva con Modo de Transferencia Asíncrono.
ATM	: <i>Asynchronous Transfer Mode</i> , Modo de Transferencia Asíncrono.
AWGN	: <i>Additive White Gaussian Noise</i> , Ruido Blanco Gaussiano Aditivo.
BER	: <i>Bit Error Rate</i> , Tasa de Error de Bit.
BPON	: <i>Broadband Passive Optical Network</i> , Red Óptica Pasiva de Banda Ancha.
BS	: <i>Base Station</i> . Estación Base.
CATV	: <i>Community Antenna Television</i> , Antena de Televisión Comunitaria.
CDM	: <i>Code Division Multiplexing</i> , Multiplexación por División de Código.
CO	: <i>Central Office</i> , Oficina Central.
CS	: <i>Central Station</i> , Estación Central.
DAB	: <i>Digital Audio Broadcasting</i> , Transmisión Digital de Audio.
DAC	: <i>Digital Analog Converter</i> , Conversor Análogo-Digital.
DMT	: <i>Discrete Multi Tone</i> , Multitono Discreto.
DVB-SH	: <i>Digital Video Broadcasting - Satellite Services to Handhelds</i> , Difusión de Vídeo Digital - Móvil por Satélite.
DVB-T	: <i>Digital Video Broadcasting - Terrestrial</i> , Difusión de Video Digital - Terrestre.
EAM	: <i>Electro Absorption Modulator</i> , Modulador de Electro-Absorción.
EB	: <i>Enhanced Band</i> , Banda Mejorada.
EHF	: <i>Extremely High Frequency</i> , Frecuencias Extremadamente Altas.
EML	: <i>Electroabsorption Modulated Laser</i> , Láser Modulado por Electro-absorción.
EOM	: <i>External Optical Modulator</i> , Modulador Óptico Externo.
EPON	: <i>Ethernet Passive Optical Network</i> , Red Óptica Pasiva Ethernet.
EVM	: <i>Error Vector Magnitude</i> , Magnitud del Vector de Error.
FDM	: <i>Frequency Division Multiplexing</i> , Multiplexación por División de Frecuencias.
FFT	: <i>Fast Fourier Transform</i> , Transformada Rápida de Fourier.
FTTA	: <i>Fiber To The Antenna</i> , Fibra Hasta La Antena.
FTTB	: <i>Fiber To The Building</i> , Fibra Hasta El Edificio.
FTTC	: <i>Fiber To The Curb</i> , Fibra Hasta El Gabinete.
FTTH	: <i>Fiber To The Home</i> , Fibra Hasta La Casa.
FTTN	: <i>Fiber To The Node</i> , Fibra Hasta El Nodo.
FTTx	: <i>Fiber To The X</i> , Fibra Hasta La X.
GbE	: <i>Gigabit Ethernet</i> , Gigabit Ethernet.
GEM	: <i>GPON Encapsulation Method</i> , Método de Encapsulamiento de GPON.
GEPON	: <i>Gigabit Ethernet Passive Optical Network</i> , Gigabit Ethernet sobre Redes Ópticas Pasivas.

GFP	: <i>Generic Framing Procedure</i> , Procedimiento de Marco Genérico.
GPON	: <i>Gigabit Passive Optical Network</i> , Red Óptica Pasiva con capacidad Gigabit.
GTC	: <i>GPON Transmission Convergence</i> , Convergencia de Transmisión GPON.
HFC	: <i>Hybrid Fiber-Coaxial</i> , Híbrido Fibra Óptica - Cable Coaxial.
ICI	: <i>Inter Carrier Interference</i> , Interferencia Inter Portadora.
IEEE	: <i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i> , Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos.
IF	: <i>Intermediate Frequency</i> , Frecuencia Intermedia.
IFFT	: <i>Inverse Fast Fourier Transform</i> , Transformada Inversa Rápida de Fourier.
IP	: <i>Internet Protocol</i> , Protocolo de Internet.
IPTV	: <i>Internet Protocol Television</i> , Televisión por Protocolo de Internet.
ISI	: <i>Inter Symbol Interference</i> , Interferencia Intersimbólica.
ITU-T	: <i>International Telecommunications Union - Telecommunications Standardization Sector</i> , Sector de Normalización de la Unión Internacional de Telecomunicaciones.
LAN	: <i>Local Area Network</i> , Red de Área Local.
LPF	: <i>Low Pass Filter</i> , Filtro Pasa Bajo.
LTE	: <i>Long Term Evolution</i> , Evolución a Largo Término.
MAN	: <i>Metropolitan Area Network</i> , Red de Área Metropolitana.
MMW	: <i>Millimeter Wave</i> , Ondas Milimétricas.
MPEG	: <i>Moving Pictures Experts Group</i> , Grupo de Expertos en Imágenes en Movimiento.
M-PSK	: <i>M-ary Phase Shift Keying</i> , Modulación M-aria por Desplazamiento de Fase.
M-QAM	: <i>M-ary Quadrature Amplitude Modulation</i> , Modulación M-aria por Amplitud y Cuadratura.
MZI	: <i>Mach Zehnder Interferometer</i> , Interferómetro Mach Zehnder.
MZM	: <i>Mach Zehnder Modulator</i> , Modulador Mach Zehnder.
NGA	: <i>Next Generation Access</i> , Acceso de Próxima Generación.
NR	: <i>New Interface Radio</i> , Nueva Interfaz Radio.
NRZ	: <i>Non Return to Zero</i> , No Retorno a Cero.
OFDM	: <i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i> , Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales.
OMCI	: <i>ONT Management and Control Interface</i> , Interfaz de Control y Gestión de la ONT.
OLT	: <i>Optical Line Terminal</i> , Terminal de Línea Óptica.
ONT	: <i>Optical Network Terminal</i> , Terminal de Red Óptica.
ONU	: <i>Optical Network Unit</i> , Unidad de Red Óptica.
OPM	: <i>Optical Performance Monitoring</i> , Monitoreo de Desempeño Óptico.
OSI	: <i>Open System Interconnection</i> , Interconexión de Sistemas Abiertos.
PBCH	: <i>Physical Broadcast Channel</i> , Canal Físico de Difusión.
PDCCH	: <i>Physical Downlink Control Channel</i> , Canal Físico de Control para el Enlace de Bajada.
PDH	: <i>Plesiochronous Digital Hierarchy</i> , Jerarquía Digital Plesiócrona.

PDSCH	: <i>Physical Downlink Shared Channel</i> , Canal Físico Compartido para el Enlace de Bajada.
PMD	: <i>Polarization Mode Dispersion</i> , Dispersión por Modo de Polarización.
PON	: <i>Passive Optical Network</i> , Red Óptica Pasiva.
PRACH	: <i>Physical Random Access Channel</i> , Canal Físico de Acceso Aleatorio.
PSTN	: <i>Public Switched Telephone Network</i> , Red de Telefonía Pública Conmutada.
PUCCH	: <i>Physical Uplink Control Channel</i> , Canal Físico de Control para el Enlace de Subida.
PUSCH	: <i>Physical Uplink Shared Channel</i> , Canal Físico Compartido para el Enlace de Subida.
QoS	: <i>Quality of Service</i> , Calidad del Servicio.
QPSK	: <i>Quadrature Phase Shift Keying</i> , Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura.
RF	: <i>Radio Frequency</i> , Radio Frecuencia.
RoF	: <i>Radio Over Fiber</i> , Radio Sobre Fibra.
SCM	: <i>Subcarrier Multiplexing</i> , Multiplexación por Subportadora.
SDH	: <i>Synchronous Digital Hierarchy</i> , Jerarquía Digital Síncrona.
SMF	: <i>Single Mode Fiber</i> , Fibra Óptica Monomodo.
SNR	: <i>Signal to Noise Ratio</i> , Relación Señal a Ruido.
SPT	: <i>Spectral Propagation Technique</i> , Técnica de Propagación Espectral.
SRS	: <i>Stimulated Raman Scattering</i> , Difusión Estimulada de Raman.
TDM	: <i>Time Division Multiplexing</i> , Multiplexación por División de Tiempo
VBS	: <i>Variable Bandwidth Simulation</i> , Simulación de Ancho de Banda Variable.
VoD	: <i>Video on Demand</i> , Vídeo bajo Demanda.
VoIP	: <i>Voice Over IP</i> , Voz sobre IP.
WAN	: <i>Wide Area Network</i> , Red de Área Amplia.
WDM	: <i>Wavelength Division Multiplexing</i> , Multiplexación por División de Longitud de Onda.
WiGig	: <i>Wireless Gigabit Alliance</i> , Alianza de Sistemas Inalámbricos Gigabit.
WiMax	: <i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i> , Interoperabilidad Mundial para el Acceso por Microondas.
WLAN	: <i>Wireless Local Area Network</i> , Red de Área Local Inalámbrica.
xDSL	: <i>x Digital Subscriber Line</i> , Línea de Abonado Digital.

Lista de Tablas

CAPITULO I

Tabla 1.1 Velocidades de datos en redes GPON.....	11
Tabla 1.2 Servicios de datos y anchos de banda necesarios.....	12
Tabla 1.3 Estándares inalámbricos que operan en la banda MMW.....	16
Tabla 1.4 Probabilidad de error de símbolo para M-QAM rectangular.....	35

CAPITULO II

Tabla 2.1 Parámetros establecidos para la simulación de la red FTTH-GPON Triple Play.....	53
Tabla 2.2 Parámetros establecidos para la simulación de la red RoF.....	54
Tabla 2.3 Parámetros establecidos para la simulación de la red FTTH-GPON Quad Play.....	55

CAPITULO III

Tabla 3.1. Resultados obtenidos para 1 ONT, a 20 Km de distancia.....	61
Tabla 3.2. Resultados obtenidos para 8 ONTs, a 5 Km de distancia.....	62
Tabla 3.3 Resultados obtenidos para 8 ONTs, a 20 Km de distancia.....	62
Tabla 3.4 Umbral mínimo requerido de EVM para el canal PDSCH de los sistemas móviles 5G.....	64
Tabla 3.5 Resultados de EVM vs portadora óptica.....	65
Tabla 3.6 Resultados de EVM vs formato de modulación, a 5 Km de distancia.....	78
Tabla 3.7 Resultados de EVM bajo una topología punto a punto.....	80
Tabla 3.8 Resultados de BER bajo una topología punto a punto.....	82
Tabla 3.9 Resultados de potencia de recepción vs distancia.....	87
Tabla 3.10 Resultados obtenidos para el receptor RoF 1, en un arreglo de 1-2.....	88
Tabla 3.11 Resultados obtenidos para el receptor RoF 2, en un arreglo de 1-2.....	88
Tabla 3.12 Resultados obtenidos para el receptor RoF 2, en un arreglo de 1-4.....	90
Tabla 3.13 Resultados obtenidos para el receptor RoF 4, en un arreglo de 1-4.....	91
Tabla 3.14 Resultados obtenidos para el receptor RoF 1, en un arreglo de 1-8.....	93
Tabla 3.15 Resultados obtenidos para el receptor RoF 2, en un arreglo de 1-8.....	93
Tabla 3.16 Parámetros de evaluación del sistema FTTH-GPON Quad Play.....	95
Tabla 3.17 Resultados de EVM vs formato de modulación, a 5 Km de distancia para el servicio de Internet móvil.....	100
Tabla 3.18 Resultados obtenidos respecto a los parámetros de evaluación del sistema, para una distancia variable.....	101
Tabla 3.19 Resultados obtenidos para la ONT 1, en un arreglo de 2 usuarios.....	104
Tabla 3.20 Resultados obtenidos para la ONT 3, en un arreglo de 4 usuarios.....	106
Tabla 3.21 Resultados obtenidos para la ONT 4, en un arreglo de 8 usuarios.....	108
Tabla 3.22 Síntesis de resultados del servicio de datos, a 5 Km de distancia.....	110
Tabla 3.23 Síntesis de resultados del servicio de datos, para el valor de distancia más crítico.....	110
Tabla 3.24 Resultados de EVM críticos vs distancia máxima alcanzada.....	113
Tabla 3.25 Resultados de BER crítica vs distancia máxima alcanzada.....	114

Lista de Ilustraciones

CAPITULO I

<i>Figura 1.1 Tecnología FTTx: a) Clasificación de la tecnología de acceso de red. b) Evolución de las tecnologías de acceso en redes de telecomunicaciones.....</i>	<i>5</i>
<i>Figura 1.2 Arquitectura FTTB.....</i>	<i>6</i>
<i>Figura 1.3 Arquitectura FTTC.....</i>	<i>6</i>
<i>Figura 1.4 Arquitectura FTTN.....</i>	<i>7</i>
<i>Figura 1.5 Arquitectura FTTH.....</i>	<i>7</i>
<i>Figura 1.6 Esquema de la arquitectura general de la tecnología FTTA.....</i>	<i>8</i>
<i>Figura 1.7 FTTA bajo la arquitectura 3G.....</i>	<i>8</i>
<i>Figura 1.8 Esquema general de una red óptica pasiva.....</i>	<i>9</i>
<i>Figura 1.9 Arquitectura de la red GPON, a nivel físico.....</i>	<i>11</i>
<i>Figura 1.10 Servicios Triple Play.....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 1.11 Transmisión de televisión en GPON.....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 1.12 Arquitectura general de un sistema RoF.....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 1.13 Arquitectura de un sistema RoF. A) Estacion Central. B) Estación Base. C) Terminal Móvil.....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 1.14 Esquema general del proceso eléctrico de un sistema RoF operando en la banda MMW.....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 1.15 Principio de ortogonalidad.....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 1.16 Arquitectura de un sistema OFDM.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 1.17 Transmisor OFDM banda base.....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 1.18 Heterodinación óptica.....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 1.19 Sistema RoF basado en el método ‘Up & down conversion’.....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 1.20 Transmisor óptico de un sistema RoF basado en modulación externa.....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 1.21 Modulador Mach Zehnder.....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 1.22 Principio de fotodetección.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 1.23 Receptor óptico basado en el principio de fotodetección.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 1.24 Ejemplo de una señal modulada en 16-QAM.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 1.25 Sistema de comunicaciones basado en M-QAM.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 1.26 Modulador M-QAM.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 1.27 Diagramas de constelación QAM.....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 1.28 Modelo general de un canal de comunicaciones.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 1.29 Demodulador M-QAM.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 1.30 Regiones de decisión de la constelación 16-QAM.....</i>	<i>34</i>

CAPITULO II

<i>Figura 2.1 EVM dentro del plano complejo IQ.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 2.2 Parámetros del diagrama del ojo.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 2.3 Efectos de distorsión, jitter y margen de ruido.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 2.4 Efecto pronunciado de jitter en el diagrama del ojo.....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 2.5 Escenario general de una red óptica pasiva.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 2.6 Diagrama general de una red FTTH-GPON Triple Play.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 2.7 Modelo conceptual del Terminal de Línea Óptico dentro de la red FTTH-GPON Triple Play.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 2.8 Modelo conceptual del Terminal de Red Óptico dentro de la red FTTH-GPON Triple Play.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 2.9 Diagrama general del sistema RoF.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 2.10 Modelo conceptual del sistema RoF.....</i>	<i>48</i>

<i>Figura 2.11 Bandas de operación en un sistema GPON.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 2.12 Modelo conceptual de la red FTTH-GPON Quad Play</i>	<i>51</i>
<i>Figura 2.13 Modelo físico de la red FTTH-GPON Triple Play.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 2.14 Modelo físico de la red FTTH-GPON Triple Play para 4 ONTs.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 2.15 Modelo físico de la red RoF.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 2.16 Modelo físico de la red FTTH-GPON Quad Play para 1 ONT.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 2.17 Modelo físico de la red FTTH-GPON Quad Play para 4 ONTs.....</i>	<i>55</i>

CAPITULO III

<i>Figura 3.1. Red FTTH-GPON Triple Play diseñada.....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 3.2 Señal de datos y VoIP generada.....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 3.3. Señal eléctrica de datos y VoIP después del NRZ.....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 3.4. Señal de de datos y VoIP después del NRZ, en el dominio de la frecuencia.....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 3.5. Espectro de la señal de datos y VoIP en el dominio óptico.....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 3.6. Señal digital de vídeo.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 3.7. Espectro de la señal QAM.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 3.8. Diagrama de constelación 16-QAM.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 3.9. Espectro óptico de la señal de vídeo.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 3.10. Espectro óptico de la señal Triple Play transmitida.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 3.11. Espectro óptico de la señal Triple Play recibida.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 3.12 Espectro óptico de la señal VoIP/datos recibida.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 3.13. Espectro óptico de la señal de vídeo RF recibida.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 3.14. Espectro de la señal VoIP/datos recibida.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 3.15. Diagrama del ojo asociado a la señal VoIP/datos recibida.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 3.16. Diagrama de constelación asociado a la señal de vídeo RF recibida.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 3.17. Diagrama del ojo asociado la señal de vídeo RF recibida, en cuadratura.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 3.18. Red RoF diseñada.....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 3.19. Diagrama de constelación obtenido en recepción. a) 1553 nm. b) 1540 nm.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 3.20. Señal digital de Internet móvil a 10 Gbps.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 3.21. Señal digital de Internet móvil en paralelo.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 3.22. Señal eléctrica M-QAM, en cuadratura.....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 3.23. Espectro de la señal M-QAM, en cuadratura.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 3.24. Proceso general del módulo IFFT-OFDM.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 3.25. Espectro de la señal OFDM banda base, en cuadratura.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 3.26. Diagrama de bloques del componente Quadrature-Mix.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 3.27. Espectro de la señal OFDM pasa banda.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 3.28. Espectro de la señal RoF antes del enlace de fibra, modulada en 16QAM.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 3.29. Espectro de la señal RoF después del enlace de fibra, modulada en 16QAM.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 3.30. Espectro de la señal OFDM pasa banda recibida.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 3.31. Espectro de la señal OFDM pasa banda transmitida, en QPSK.....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 3.32. Espectro de la señal OFDM pasa banda recibida, en QPSK.....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 3.33. Espectro de la señal en cuadratura a la salida del componente Quadrature-Mix, modulada en 64QAM.....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 3.34. Espectro de la señal en cuadratura a la salida del filtro pasa bajo, modulada en 64QAM.....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 3.35. Espectro de la señal OFDM banda base recibida, en cuadratura.....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 3.36. Espectro de la señal M-QAM recibida, en cuadratura.....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 3.37. Diagramas de constelación obtenidos.....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 3.38. Símbolos QAM recibidos, en cuadratura, y modulados en 256QAM.....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 3.39. Señal digital recibida, demodulada en 256QAM.....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 3.40. Resultados de EVM vs longitud del enlace.....</i>	<i>81</i>

Figura 3.41. Resultados de EVM vs longitud del enlace, para 256QAM.....	81
Figura 3.42. Resultados de BER vs longitud del enlace, para QPSK, 16QAM y 64QAM.....	83
Figura 3.43. Diagramas de constelación obtenidos para QPSK.....	84
Figura 3.44. Diagramas de constelación obtenidos para 16QAM.....	85
Figura 3.45. Diagramas de constelación obtenidos para 64QAM.....	86
Figura 3.46. Diagramas de constelación obtenidos para 256QAM.....	87
Figura 3.47. a) Diagrama de constelación QPSK en el RxRoF1 a 9Km. b) Diagrama de constelación QPSK en el RxRoF1 a 12 Km.....	89
Figura 3.48. a) Diagrama de constelación 16QAM en el RxRoF1 a 11Km b) Diagrama de constelación 16QAM en el RxRoF1 a 12 Km.....	89
Figura 3.49. a) Diagrama de constelación 64QAM en el RxRoF1 a 9 Km. b) Diagrama de constelación 256QAM en el RxRoF1 a 1 Km.....	89
Figura 3.50. a) Diagrama de constelación QPSK en el RxRoF2 a 9 Km. b) Diagrama de constelación QPSK en el RxRoF3 a 12Km.....	91
Figura 3.51. a) Diagrama de constelación 16QAM en el RxRoF4 a 11Km. b) Diagrama de constelación 16QAM en el RxRoF2 a 12Km.....	91
Figura 3.52. a) Diagrama de constelación 64QAM en el RxRoF1 a 9Km. b) Diagrama de constelación 256QAM en el RxRoF3 a 1Km.....	92
Figura 3.53. a) Diagrama de constelación QPSK en el RxRoF6 a 9Km. b) Diagrama de constelación QPSK en el RxRoF6 a 12Km.....	93
Figura 3.54. a) Diagrama de constelación 16QAM en el RxRoF1 a 11Km. b) Diagrama de constelación 16QAM en el RxRoF6 a 12Km.....	94
Figura 3.55. a) Diagrama de constelación 64QAM en el RxRoF6 a 9Km. b) Diagrama de constelación 256QAM en el RxRoF1 a 1Km.....	94
Figura 3.56. Red FTTH-GPON Quad Play con topología árbol.....	96
Figura 3.57. Espectro óptico del servicio de VoIP/datos.....	97
Figura 3.58. Espectro óptico del servicio de CATV Digital.....	97
Figura 3.59. Espectro óptico del servicio de Internet móvil, al modular en 16QAM.....	97
Figura 3.60. Espectro óptico de la señal Quad Play.....	97
Figura 3.61. Espectro óptico de la señal Quad Play recibida.....	98
Figura 3.62. Espectro óptico de la señal de VoIP/datos recibida.....	98
Figura 3.63. Espectro óptico de la señal CATV Digital recibida.....	98
Figura 3.64. Espectro óptico de la señal RoF recibida.....	98
Figura 3.65. Diagrama del ojo obtenido de la señal de VoIP/datos.....	99
Figura 3.66. Diagrama de constelación obtenido de la señal CATV Digital.....	99
Figura 3.67. Diagrama de constelación obtenido de la señal RoF.....	100
Figura 3.68. Resultados de BER vs longitud del enlace, Internet móvil.....	102
Figura 3.69. Resultados de EVM vs longitud del enlace, Internet móvil.....	102
Figura 3.70. Diagrama de constelación de la señal RoF, para el caso más crítico.....	103
Figura 3.71. A) Diagrama de constelación QPSK en la ONT1 a 12 Km. B) Diagrama de constelación 16-QAM en la ONT1 a 11 Km.....	105
Figura 3.72. A) Diagrama de constelación 64-QAM en la ONT2 a 9 Km. B) Diagrama de constelación 256-QAM en la ONT1 a 1 Km.....	105
Figura 3.73. A) Diagrama de constelación QPSK en la ONT1 a 12 Km. B) Diagrama de constelación 16QAM en la ONT3 a 11 Km.....	107
Figura 3.74. A) Diagrama de constelación 64-QAM en la ONT3 a 11 Km. B) Diagrama de constelación 256-QAM en la ONT1 a 1 Km.....	107
Figura 3.75. A) Diagrama de constelación QPSK en la ONT1 a 12 Km. B) Diagrama de constelación 16QAM en la ONT3 a 11 Km.....	108
Figura 3.76. A) Diagrama de constelación 64-QAM en la ONT8 a 9 Km. B) Diagrama de constelación 256-QAM en la ONT3 a 1 Km.....	108

Figura 3.77. Diagrama del ojo obtenido de la señal de datos para 1 ONT a 5 Km de distancia.....110
Figura 3.78. Diagrama de constelación obtenido de la señal de vídeo, para 1 ONT a 5 Km de distancia, con un tiempo simulado de 12 ns.....112
Figura 3.79. Diagrama de ojo, en cuadratura, obtenido de la señal de vídeo, para 1 ONT a 5 Km de distancia, con un tiempo simulado de 12 ns.....112

INTRODUCCIÓN

La prestación de servicios *Triple Play*, es decir, servicios de voz, televisión e Internet, fue desplegada inicialmente a partir de tecnologías como la Línea de Abonado Digital (*xDSL*, *x Digital Subscriber Line*) y Cable Módem, sobre medios de transmisión alámbricos como par trenzado y cable coaxial, respectivamente [1]. Sin embargo, a partir de la gran demanda del servicio de Internet residencial y las exigencias de grandes anchos de banda por parte de los usuarios finales, las empresas de telecomunicaciones han realizado una migración hacia redes de acceso basadas en fibra óptica. A partir de esto, surge una familia de tecnologías diseñada para la prestación de servicios *Triple Play*, denominada Fibra Hasta la X (*FTTx*, *Fiber To The X*), en donde la red establece un enlace, a través de fibra óptica, entre una central de servicios y un determinado punto de acceso o nodo; en el caso particular de la red que llega al domicilio del usuario, la tecnología se denomina Fibra Hasta La Casa (*FTTH*, *Fiber To The Home*), la cual se presenta como una solución ante la gran demanda de servicios de televisión, Internet y telefonía por parte del usuario final [2]. Por otra parte, el despliegue de una red de acceso basada en fibra óptica es posible a partir de diversas arquitecturas de red; una de ellas consiste en la Red Óptica Pasiva con Capacidad Gigabit (*GPON*, *Gigabit Passive Optical Network*), la cual soporta velocidades de transmisión de datos superiores a 1 Gbps y presenta una reducción de costos operacionales, en comparación a otras arquitecturas de red, al carecer de elementos activos [3]. Por lo anterior, diversos proveedores de servicios despliegan redes FTTH-GPON para la prestación de servicios *Triple Play* con el fin de brindarle al usuario grandes anchos de banda, altas tasas de transmisión de datos y una buena relación costo-beneficio.

A partir del despliegue de redes FTTH-GPON, surge la necesidad por parte del cliente de acceder al servicio de Internet de forma remota (inalámbrica) a tasas de transmisión de datos muy elevadas, del orden de los multi-Gbps, sin embargo, tecnologías inalámbricas actuales como *Gigabit Ethernet* y *Long Term Evolution* solo permiten alcanzar velocidades máximas de 1 Gbps, en las mejores condiciones del sistema. Por lo tanto, para alcanzar velocidades de multi-Gbps en sistemas no guiados, se han realizado estudios de redes que operan en la banda de Ondas Milimétricas (*MMW*, *Millimeter Wave*) cuyo rango está entre 30 y 300 GHz, pero se han presentado algunos inconvenientes como las altas pérdidas en el espacio libre que se producen al transmitir en frecuencias tan altas y la necesidad de implementar más estaciones base y de aumentar la potencia de transmisión si se pretende alcanzar grandes coberturas, de modo que, su despliegue estaría limitado a ambientes *indoor* o femtoceldas. A partir de esto, surge el concepto Radio sobre Fibra (*RoF*, *Radio over Fiber*) como una solución prometedora a la exigencia del cliente de tener una conexión a altas tasas de transmisión sin necesidad de conectarse a un punto de acceso cableado; cabe resaltar que los sistemas RoF se enfocan en gran medida en la prestación de servicios móviles, por lo que dentro del contexto de los sistemas GPON, es necesario realizar una convergencia entre las tecnologías FTTH y RoF, para ofrecer al cliente la prestación tanto de servicios *Triple Play* como del servicio de Internet móvil de alta velocidad, lo que se denomina como servicios *Quad Play* [4] [5].

Actualmente, se han desarrollado estudios a nivel institucional, nacional e internacional de la implementación de sistemas RoF, aunque no existe un estándar ni una definición formal del concepto. A nivel internacional, existe variedad de documentos que ilustran las diferentes formas de implementación de sistemas RoF que operan en la banda MMW a

partir de determinados escenarios y parámetros técnicos [6] [7]; a nivel nacional, es posible encontrar algunos estudios que presentan de forma detallada el diseño e implementación de sistemas RoF, exclusivamente para la prestación de servicios de telefonía e Internet móvil [8] [9] [10].

A nivel institucional, existe un trabajo de investigación en donde se planteó un sistema FTTH-GPON para la prestación de servicios *Quad Play*, donde se propuso una red GPON capaz de ofrecer servicios de VoIP, Internet, televisión digital e Internet móvil, al integrar un módulo RoF a una red FTTH-GPON *Triple Play* convencional. En la investigación, se propuso un módulo RoF el cual genera una señal eléctrica de 10 GHz, para luego ser enviada a través de la fibra óptica. Los autores plantearon un sistema de transmisión basado en Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales (*OFDM, Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) que opera con 8 subportadoras, con prefijo cíclico normal de 0.25, y una modulación banda base de 16-QAM, a una velocidad de 10Gbps; la señal eléctrica generada se modula ópticamente a través del modulador de electro-absorción. El sistema fue analizado al variar el número de usuarios y la longitud de la fibra, logrando un buen desempeño para una distancia máxima de 5.887 Km; lo anterior simulado mediante la herramienta software OptSim [11].

A partir de la investigación expuesta en [11], surge el presente trabajo de investigación, el cual pretende analizar la incidencia a nivel físico de la técnica de Modulación en Amplitud y Cuadratura (*QAM, Quadrature Amplitude Modulation*) sobre un módulo RoF en una red FTTH-GPON. En este estudio se pretende caracterizar, en primer lugar, una red *Triple Play* para la prestación de servicios estandarizados de VoIP/Internet y televisión digital, en segundo lugar, un módulo RoF para la prestación del servicio de Internet móvil analizando su comportamiento a nivel físico al variar la técnica de modulación M-QAM, y por último, una red FTTH-GPON *Quad Play* donde se hará un análisis de la incidencia de la técnica de modulación M-QAM en el sistema completo. En resumen, el presente trabajo de grado pretende resolver el interrogante:

¿Cuál es la incidencia a nivel físico de la técnica de modulación M-QAM sobre un módulo RoF en una red FTTH-GPON?

Para resolver el interrogante se plantea la presente monografía donde, a lo largo de cuatro capítulos y sus respectivos anexos, se exponen los fundamentos conceptuales de las temáticas involucradas, se describe una metodología para el desarrollo y simulación, se desarrollan los escenarios de simulación y se analizan los resultados obtenidos. La organización del documento se presenta de la siguiente manera:

En el capítulo I se describe de forma general la teoría de las temáticas involucradas. En primer lugar, se describen los componentes de un sistema FTTH-GPON en el marco de los servicios *Triple Play*, en segundo lugar, se expone sobre los sistemas RoF, sus características principales, arquitectura, escenarios de implementación, entre otros, y por último, se hace una descripción teórica detallada de la técnica de modulación digital M-QAM.

En el capítulo II se propone una metodología para el desarrollo y simulación basada en la Metodología de Equipos de Telecomunicaciones; a partir de ésta, se describen algunos aspectos iniciales dentro del proceso de simulación, tales como: Escenarios de simulación,

parámetros de evaluación del sistema y herramienta de simulación; posteriormente, se definen los modelos conceptuales de la red por cada escenario de simulación planteado; y finalmente, se presentan los modelos físicos de red caracterizados mediante la herramienta de simulación.

En el capítulo III se desarrolla la fase de pruebas y análisis de resultados de la metodología planteada, en particular, se exponen los resultados obtenidos por cada escenario de simulación en función de las gráficas de la señal en las diferentes etapas del sistema y de los parámetros de evaluación del sistema.

Finalmente, en el capítulo IV se listan las conclusiones del trabajo, algunas recomendaciones sobre el proyecto de investigación, como también, algunos posibles trabajos futuros.

CAPÍTULO I: MARCO CONCEPTUAL

El presente trabajo de grado se enfoca en realizar un análisis de la incidencia a nivel físico de la técnica de modulación QAM sobre un módulo RoF en un sistema FTTH-GPON, para la prestación de servicios *Quad Play*. De esta manera, este capítulo se compone de un marco teórico en torno a los tópicos que deben ser tenidos en cuenta para la implementación del sistema.

En la primera sección, se expone sobre las temáticas involucradas en la conformación de un sistema FTTH-GPON en el contexto de los servicios *Triple Play*; primero se describe de forma general las consideraciones que involucran la familia de tecnologías FTTx, luego, se hace un enfoque hacia las redes GPON, las cuales se rigen a partir del estándar ITU-T G.984, y finalmente, se realiza una breve descripción de los servicios *Triple Play*.

En la segunda sección, se hace un estudio de los sistemas RoF, enfocados principalmente a aquellos que operan en la banda MMW. Se describe el concepto RoF, se expone la arquitectura de los sistemas RoF y se definen los componentes que lo conforman, tales componentes pueden ser vistos como uno que realiza los procesos eléctricos y otro que se encarga de los procesos ópticos; en primer lugar, para los procesos eléctricos, se realiza un estudio acerca de los sistemas de transmisión multiportadora, en particular, los sistemas basados en la técnica OFDM la cual es ampliamente utilizada en estándares de comunicación inalámbricos que operan en la banda MMW, y en segundo lugar, se realiza un estudio acerca de los procesos ópticos, los cuales corresponden a la generación de la señal óptica y su respectivo proceso de modulación.

Cabe resaltar que los sistemas de transmisión OFDM se basan típicamente en técnicas de modulación en amplitud y cuadratura; y teniendo en cuenta el enfoque del trabajo de grado, en la sección 3 del presente capítulo se expone la técnica de modulación digital M-QAM, en donde, se describe sus características, arquitectura en bloques, proceso matemático, diagramas de constelación y parámetros de medición como la probabilidad de error de símbolo.

1.1 SISTEMAS FTTH-GPON TRIPLE PLAY

1.1.1 TECNOLOGÍA FTTx

Actualmente, la demanda del servicio de Internet residencial es de tal magnitud que ha ocasionado que tecnologías de redes de acceso convencionales basadas en cobre presenten limitantes en cuanto a velocidades de transmisión de datos y anchos de banda a usuarios finales. Por lo cual, los proveedores de servicios de telecomunicaciones están migrando sus redes hacia redes de acceso estructuradas mediante fibra óptica, dado que permiten obtener velocidades de transmisión elevadas, soportan servicios de alta capacidad, brindan grandes anchos de bandas, son inmunes a las interferencias electromagnéticas, son redes flexibles y escalables, y presentan pérdidas de propagación entre 0,2 dB/Km y 0,5 dB/Km, siendo muy bajos valores en comparación con el cobre. Así, el desarrollo de la fibra óptica mono modo con su enorme capacidad de transmisión ha permitido aumentar significativamente la calidad del servicio (QoS, *Quality of Service*) en comparación a redes de acceso basadas en cobre. Sin embargo, a pesar de las ventajas de la fibra óptica como medio de transmisión, ésta sigue sin ser demasiado utilizada en los

tramos finales, es decir, en tramos desde el nodo central hasta el domicilio de los usuarios; este segmento de la red se encuentra normalmente desplegado mediante líneas xDSL o líneas híbridas de fibra óptica y coaxial (*HFC, Hybrid Fiber-Coaxial*) [12].

A partir del despliegue de redes de acceso basadas en fibra óptica, surge una familia de tecnologías denominada FTTx, donde X denota el punto de terminación de la red de acceso, es decir, se lleva el tramo de fibra hasta el nodo, gabinete, edificio, casa, etc. [2].

En la Figura 1.1 (a) se ilustra una clasificación, realizada en [13], de los diferentes tipos de FTTx según la distancia entre el cliente y el tramo final de fibra. En la Figura 1.1 (b) se puede apreciar la evolución, en términos de velocidad, de las tecnologías de acceso de redes de telecomunicaciones, y el papel de FTTx en los años recientes.

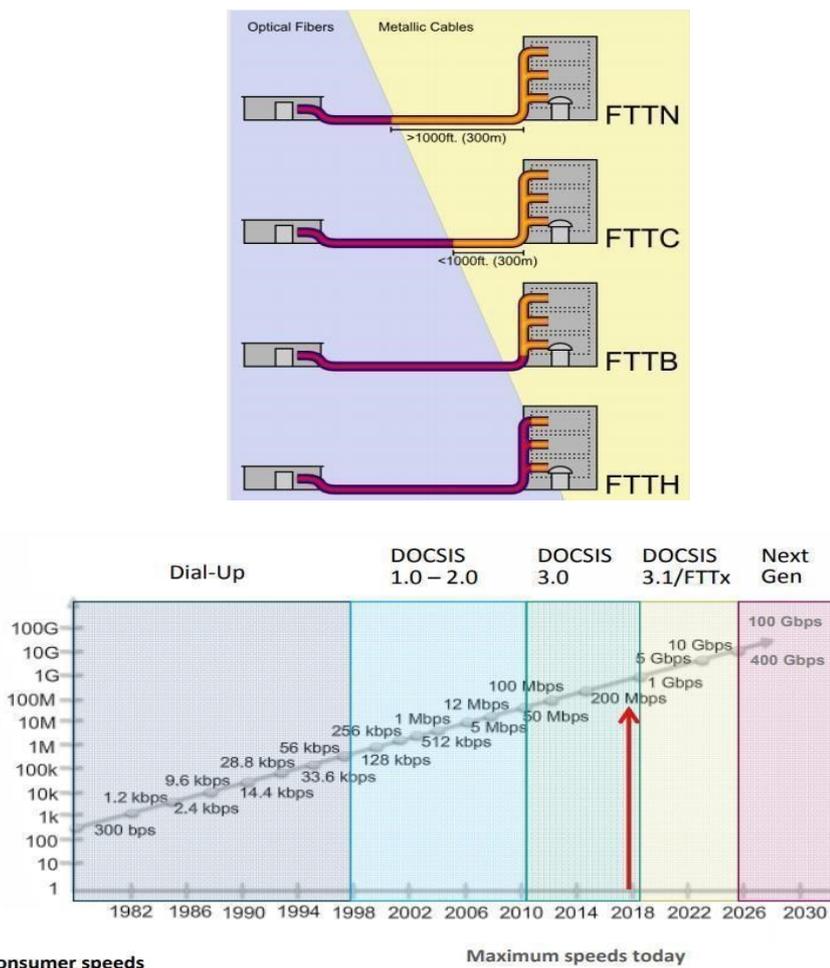


Figura 1.1. Tecnología FTTx. (a) Clasificación de la tecnología de acceso [13]. (b) Evolución de la velocidad en redes de telecomunicaciones [14].

A continuación, se ilustran algunas arquitecturas de las tecnologías FTTx más relevantes, a partir de la literatura estudiada en [13 - 16].

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

En esta tecnología, se hace uso de un solo enlace de fibra óptica desde la oficina central del proveedor de servicios hasta un punto de terminación óptico ubicado dentro del edificio, dejando la conexión final hacia los usuarios por medio de la infraestructura de red de

cableado estructurado. Además, mediante su despliegue se puede garantizar la prestación de servicios a 32 hogares por fibra óptica, aproximadamente, con una velocidad máxima de 100 Mbps. En la Figura 1.2, se ilustra la arquitectura general de esta tecnología.



Figura 1.2. Arquitectura FTTB [14].

- Tecnología Fibra Hasta el Gabinete (*FTTC, Fiber To The Curb*)

En esta tecnología, la unidad de red óptica se encuentra ubicada a una distancia menor a 300 m de la residencia de los usuarios finales, y la conexión final se hace a través de la infraestructura de red existente, produciendo un menor costo en su implementación; además, por medio de su despliegue, se espera la prestación de servicios para una cantidad de usuarios finales entre 10 y 100, a una velocidad de datos máxima de 50 Mbps. En la Figura 1.3 se aprecia su arquitectura general.

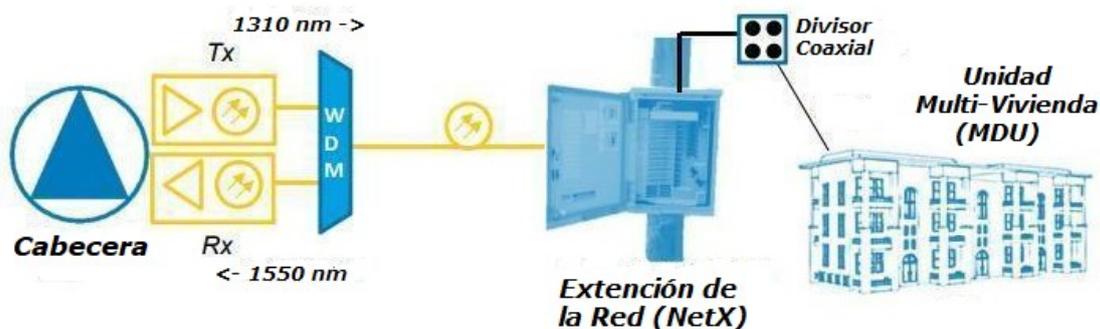


Figura 1.3 Arquitectura FTTC [14].

- Tecnología Fibra Hasta el Nodo (*FTTN, Fiber To The Node*).

En esta tecnología, la estación central se conecta a través de fibra óptica con la unidad de red óptica, la cual es representada por un nodo central que se encarga de la distribución hacia diferentes zonas residenciales de la región a través de la infraestructura de red existente; este nodo se puede encontrar a más de 300 m del domicilio de los usuarios finales, lo que hace posible la prestación de servicios para una cantidad de usuarios finales entre 200 y 500 por fibra óptica, so pena de una velocidad máxima de transmisión de datos de 30 Mbps, siendo la tecnología de la familia FTTx que proporciona la tasa de bits más baja. En la Figura 1.4 se puede observar su esquema general.

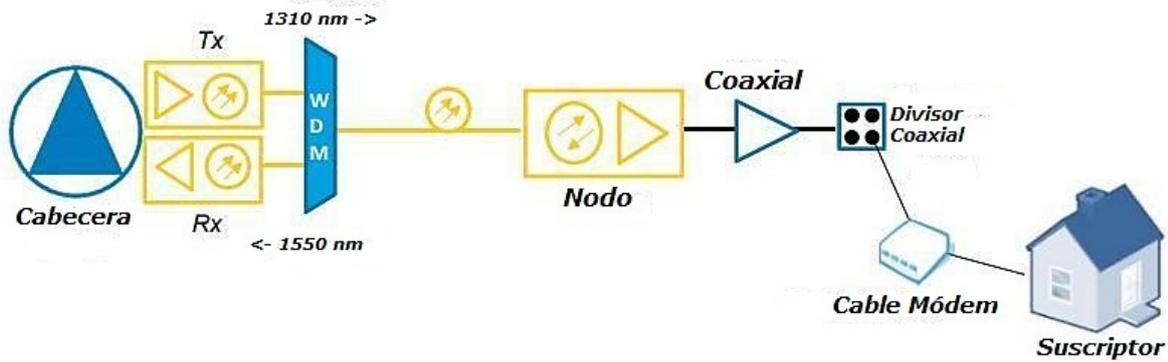


Figura 1.4. Arquitectura FTTN [14].

- Tecnología Fibra Hasta la Casa

En esta tecnología, la prestación de servicios para el usuario final, se hace por medio de una fibra óptica dedicada hacia su residencia, donde se encuentra la unidad de red óptica. Su despliegue se caracteriza por la enorme capacidad de ancho de banda y las altas velocidades de transmisión de datos que ofrecen en la prestación de servicios de banda ancha como Internet y televisión. En comparación con las otras tecnologías de la familia FTTx, es la que mejor desempeño presenta en la prestación de servicios, sin embargo, es la que más fibras ópticas requiere para su despliegue, lo cual se traduce en costos muy elevados. En la Figura 1.5 se ilustra su configuración general.



Figura 1.5. Arquitectura FTTH [14].

- Tecnología Fibra Hasta la Antena (FTTA, Fiber To The Antenna)

En esta tecnología, una estación central típicamente orientada a servicios móviles, se conecta por medio de fibra óptica hasta una antena remota que se encarga de la futura propagación radioeléctrica. En general, fue desarrollada principalmente en el marco de las redes móviles de tercera generación (3G, *Third Mobile Generation*) con el fin de aumentar su velocidad de transmisión y disminuir los tiempos de respuesta del sistema, por lo cual, variedad de estudios plantean esquemas de FTTA orientados a la arquitectura general de los sistemas 3G. En la Figura 1.6 se ilustra un diagrama general, que puede ser aplicado a cualquier contexto, y en la Figura 1.7 se presenta el modelo orientado a los sistemas móviles 3G.

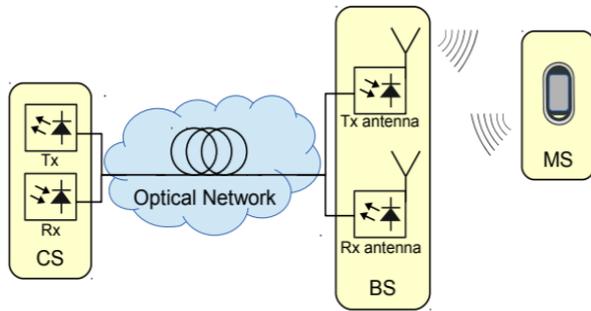


Figura 1.6. Esquema de la arquitectura general de la tecnología FTTH [15].

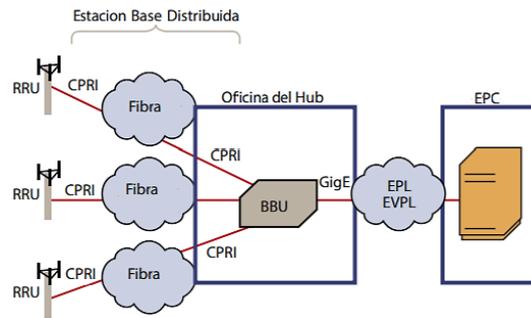


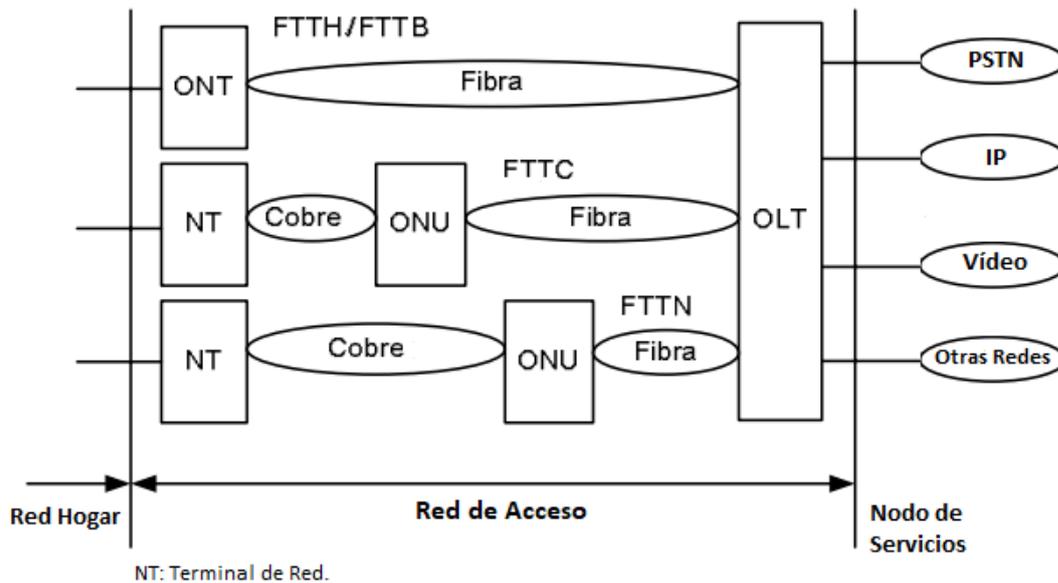
Figura 1.7. FTTH bajo la arquitectura 3G [16].

1.1.2 REDES ÓPTICAS PASIVAS

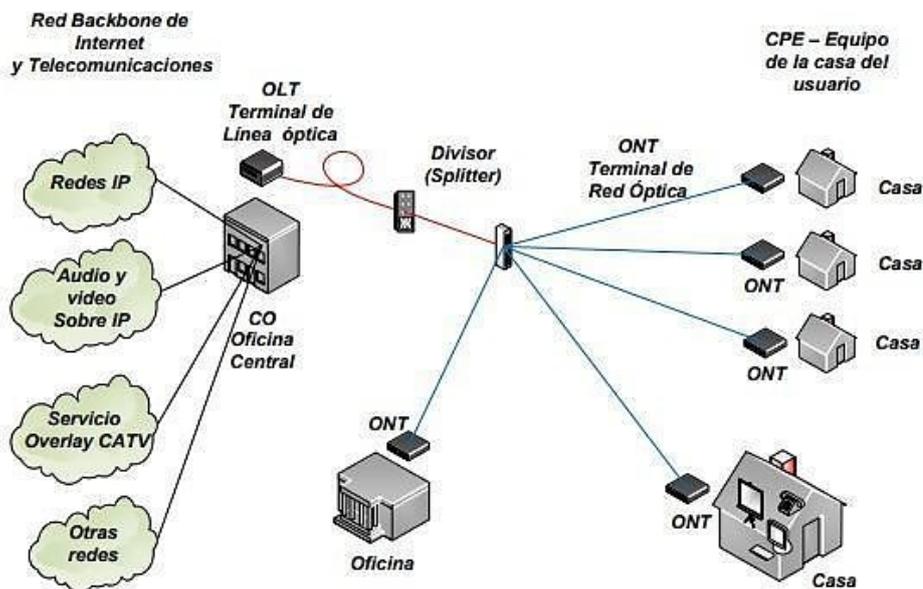
Una red de acceso basada en fibra óptica se puede estructurar de diferentes maneras. Una de ellas es mediante el despliegue de redes basadas en el estándar IEEE 802.1ah, el cual brinda una ruta de implementación de redes ópticas que se rigen a partir de la tecnología de red Ethernet, haciendo uso de elementos activos para garantizar largas distancias entre una determinada oficina central y sus abonados. El estándar establece que las redes ópticas activas Ethernet brindan anchos de banda simétricos del orden de los Multi-Gpbs, mediante un modo de transmisión *FullDuplex*, es decir, que los enlaces *Uplink* y *Downlink* operan con longitudes de onda diferentes [17].

Otra manera de implementar una red de acceso basada en fibra óptica es mediante Redes Ópticas Pasivas (*PON, Passive Optical Network*), las cuales proporcionan velocidades superiores a 1 Gpbs y su despliegue carece de elementos activos, lo que genera una reducción en costos operacionales. El despliegue de redes PON se presenta como una solución tecnológica para ofrecer acceso de fibra óptica a usuarios finales [18].

Una red PON es una red de acceso óptica sin elementos activos entre la fuente y el destino. En ella, todos los procesos de transmisión operan entre un Terminal de Línea Óptica (*OLT, Optical Line Terminal*) y Unidades de Red Óptica (*ONU, Optical Network Unit*) a través de elementos pasivos como *splitters* y combinadores. La OLT se encuentra en la Oficina Central (*CO, Central Office*) y conecta las redes de acceso ópticas con Redes de Área Metropolitana (*MAN, Metropolitan Area Network*) y Redes de Área Amplia (*WAN, Wide Area Network*). La ONU, por su parte, entrega servicios de datos, vídeo y voz a sus suscriptores según la tecnología de acceso utilizada, tal como se aprecia en la Figura 1.8 [18].



(a)



(b)

Figura 1.8 Esquema general de una Red Óptica Pasiva. (a) Red PON con tecnología de acceso FTTx [18]. (b) Red PON con tecnología FTTH [19].

La primera evolución de las redes PON consistió en la incorporación del protocolo Modo de Transferencia Asíncrona (ATM, *Asynchronous Transfer Mode*) de nivel 2, según el Modelo de Interconexión de Sistemas (OSI, *Open System Interconnection*), a la red PON, denominándose APON (ATM-PON, *Asynchronous Transfer Mode Passive Optical Network*), la cual posteriormente evolucionó en la Red Óptica Pasiva de Banda Ancha (BPON, *Broadband Passive Optical Network*). Más adelante, se incorporó el Protocolo de Marco Genérico (GFP, *Generic Frame Protocol*) de nivel 2, según el modelo OSI, a las redes ópticas, dando como resultado el despliegue de redes GPON; lo anterior, se establece en la recomendación G.984.x del Sector de Normalización de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU-T, *International Telecommunications Union - Standardization*). Del

mismo modo, se evolucionó a la red Ethernet-PON (*EPON, Ethernet Passive Optical Network*) y la red EPON con capacidad Gigabit (*GEPON, Gigabit Ethernet Passive Optical Network*), las cuales presentan soluciones para el despliegue de redes PON exclusivamente para las desarrolladas bajo la tecnología de acceso Ethernet [20].

Las redes PON son implementadas principalmente bajo las topologías de árbol y estrella, aunque también soporta las topologías tipo bus, anillo o configuraciones redundantes. Para la transmisión en el enlace *Downlink* la red PON conforma una red Punto-Multipunto en donde se puede hacer uso de todo el ancho de banda en cualquier intervalo de tiempo; mientras que para la transmisión en el enlace *Uplink* la red PON conforma una red Multipunto-Punto, donde múltiples ONUs transmiten información hacia una OLT. De esta forma, si diferentes cantidades de información son transmitidas simultáneamente por múltiples ONUs, podría existir el riesgo de una colisión de la información, por lo cual, la transmisión en el enlace *Uplink* debe emplear algunos mecanismos de control de acceso al medio para evitar colisiones y compartir de forma eficiente los recursos y la capacidad del canal óptico.

Para garantizar la comunicación entre múltiples suscriptores de la red, compartiendo una única arquitectura de red PON, existen diferentes técnicas de acceso como: Multiplexación por División de Tiempo (*TDM, Time Division Multiplexing*), Multiplexación por División de Longitud de Onda (*WDM, Wavelength Division Multiplexing*), Multiplexación por Subportadora (*SCM, Subcarrier Multiplexing*) y Multiplexación por División de Código (*CDM, Code Division Multiplexing*). Sin embargo, las técnicas TDM y WDM se presentan como las mejores soluciones en los sistemas prácticos. TDM, por su parte, se presenta como una solución ideal para los requerimientos de ancho de banda actuales, mientras que WDM representa la solución ideal para redes ópticas actuales y redes futuras que soporten servicios de gran capacidad [18]. Para el caso particular de TDM, el método usado como mecanismo de control de acceso al medio corresponde a TDMA (*TDMA, Acceso Múltiple por División de Tiempo*), en donde a cada ONU se le asigna un intervalo de tiempo para la transmisión de información [20].

1.1.2.1 RED OPTICA PASIVA CON CAPACIDAD GIGABIT

La ITU-T define a la red GPON en las recomendaciones G.984 series 1-4. La recomendación G.984-1 describe las características generales de la red GPON; la recomendación G.984-2 expone la especificación de la capa física (*PMD, Physical Medium Dependent*); la recomendación G.984-3 describe la especificación de la capa de transmisión (*GTC, Transmission Convergence*); y finalmente, la recomendación G.984-4 describe la ONU y las especificaciones de la interfaz de control y gestión (*OMCI, ONT Management and Control Interface*). La red GPON se puede definir como la evolución de las redes ópticas pasivas APON y BPON, debido a que soporta el transporte de información mediante ATM e incluso Ethernet, por medio del Método de Encapsulamiento GPON (*GEM, GPON Encapsulating Method*), el cual se encarga de encapsular el tráfico Ethernet y el tráfico ATM de un determinado enlace [20].

La recomendación ITU-T G.984 describe una red de acceso óptica flexible, escalable (Velocidades de 622 Mbps a 2.5 Gbps), con un alcance máximo de hasta 60 Km incluida una distancia diferencial de 20 Km entre las ONTs, con una tasa de división máxima en los dispositivos *Splitter* de 1:64, con rangos de longitudes de onda desde 1480 a 1500 nm para transmisión en el enlace *Downlink* y de 1260 a 1360 nm en el enlace *Uplink*, y capaz de

soportar grandes requerimientos de anchos de banda para la prestación de servicios. Dicho ancho de banda puede ser simétrico o asimétrico; el primero ofrece velocidades en el enlace *Uplink* y *Downlink* de hasta 2.5 Gbps, y el segundo ofrece velocidades de 1.25Gbps en el enlace *Uplink* y 2.5 Gbps en el enlace *Downlink* [18]. En general, según el estándar, la red GPON permite alcanzar las siguientes velocidades de transmisión:

Tabla 1.1. Velocidades de datos en redes GPON [20].

<i>Downstream</i>	<i>Upstream</i>
1244.16 Mbps	622.08 Mbps
1244.16 Mbps	1244.16 Mbps
2488.32 Mbps	622.08 Mbps
2488.32 Mbps	1244.16 Mbps
2488.32 Mbps	2488.32 Mbps

En la Figura 1.9, se presenta una arquitectura de red GPON, para la prestación de servicios de datos, y vídeo. Cabe resaltar, que para la prestación diversos servicios además de los datos, en la recomendación ITU-T G.984.5 se establece un rango extra de longitudes de onda de transmisión entre los 1530 nm hasta los 1580 nm aproximadamente, denominado banda mejorada (*EB, Enhanced Band*), dedicados a la transmisión de diferentes tipos de servicios, tales como: Servicios de Acceso de Próxima Generación (*NGA, Next Generation Access*), distribución de vídeo sobre radiofrecuencia y vídeo bajo demanda (*VoD, Video on Demand*).

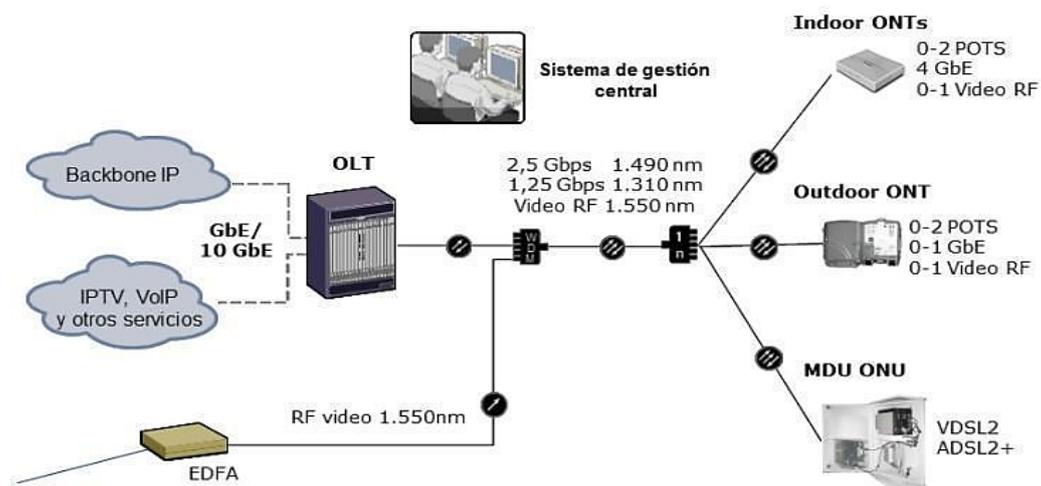


Figura 1.9 Arquitectura de una red GPON [3].

1.1.3 SERVICIOS TRIPLE PLAY

Los servicios *Triple Play* surgen de la necesidad de transportar diversos servicios de carácter residencial a través de una única red de acceso, es decir, brindarle al usuario final acceso a los principales servicios conformados por datos (Internet), voz y vídeo en un solo portafolio. Su prestación está sujeta a diferentes circunstancias debido a las combinaciones de diversos

tipos de tráfico que se producen, por lo cual el rendimiento de su despliegue debe ser considerado en términos de latencia, pérdida de datos y velocidad de transmisión; en general, pueden ser aplicados una variedad de parámetros orientados a QoS para lograr la medida de velocidad de datos y tiempos de respuesta del sistema, según las diferentes combinaciones de tráfico existentes en la red [20].

En la Figura 1.10 se aprecia una arquitectura general para el despliegue de servicios *Triple Play*.

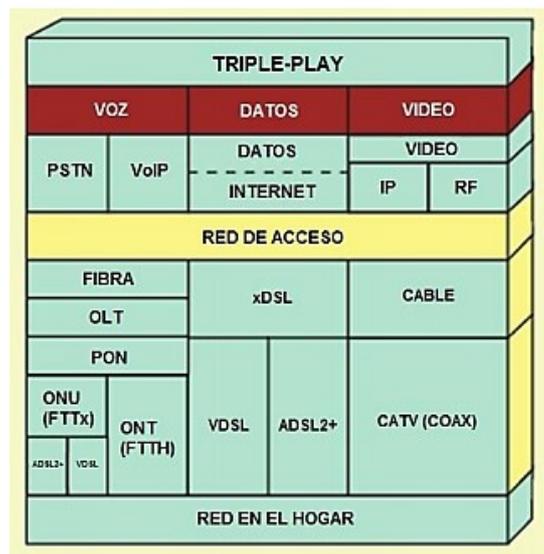


Figura 1.10. Servicios Triple Play [21].

A continuación, se describen los servicios de datos, vídeo y voz:

- Servicio de datos

Corresponde a los diferentes servicios de banda ancha que se pueden ofrecer a través de Internet, que abarcan un abanico de opciones entre navegación en Internet, teleconferencias, VoD, videojuegos en línea, descargas de música y vídeo, servicios de telecontrol, comunicación telefónica sobre IP (VoIP, *Voice over Internet Protocol*), televisión sobre IP (IPTV, *Internet Protocol Televisión*), servicios de telemedicina, entre otros [22]. Los anchos de banda necesarios que requieren algunos servicios de datos, se muestran en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2. Servicios de datos y anchos de banda necesarios [22].

<i>Tipo de Servicio de Datos</i>	<i>Demanda de ancho de banda [Mbps]</i>
VoD	15
Videoconferencias	1
Navegación en Internet	1.5
Juegos en línea	1

- Servicio de vídeo.

El servicio de distribución de vídeo o servicio de televisión se puede desplegar de diferentes maneras; la primera consiste en la transmisión de la señal de televisión, ya sea digital o analógica, de forma *broadcast*, donde se utiliza un canal de longitud de onda dedicado para su transmisión, la segunda opción consiste en la transmisión encapsulada por paquetes IP, es decir, IPTV, en la cual se transmite en conjunto con los diferentes servicios de datos encapsulados en tráfico IP [21]. En particular, para redes FTTH-GPON, la transmisión de vídeo tiene las características mostradas en la Figura 1.11

IPTV	CATV Analógico	CATV Digital
Ethernet /IP	Señal <i>Broadcast</i>	
1490 nm (<i>Downstream</i>) 1310 nm (<i>Upstream</i>)	1550 nm (<i>Downstream</i>)	
Fibra Óptica		

Figura 1.11. Transmisión de televisión en GPON [21].

- Servicio de voz

El servicio de voz puede ser el servicio tradicional brindado por la Red Pública Telefónica Conmutada (*PSTN, Public Switched Telephone Network*) o se puede considerar como el servicio de VoIP, el cual presenta numerosas ventajas en relación al servicio de voz tradicional en cuanto a costos de operación y disponibilidad. El servicio de VoIP se basa en el encapsulamiento de la voz en paquetes IP y presenta algunos beneficios tanto para el cliente como para el proveedor, los cuales se listan a continuación [21]:

- Mínimo costo del servicio al usuario, debido a que evita estar afiliado a una central de conmutación.
- Posibilidad de integración a la red de datos para los proveedores de servicio, evitando tener gastos en otras arquitecturas de red, centralizando procesos de gestión, y minimizando costos en tareas de instalación.

1.2 SISTEMAS RoF

En la actualidad, debido al inminente éxito del despliegue de redes de acceso basadas en fibra óptica, en cuanto a velocidades de transmisión y anchos de banda, surge la necesidad, por parte de usuarios finales, de acceder de forma permanente desde cualquier dispositivo a los diferentes servicios ofrecidos por el proveedor a elevadas tasas de transmisión y grandes anchos de banda sin la necesidad de conectarse a un punto de acceso cableado. Sin embargo, tecnologías inalámbricas actuales no cumplen tales requisitos; las redes móviles de cuarta generación mediante la tecnología LTE suministran velocidades alrededor de 1 Gbps, y las redes Ethernet para sistemas inalámbricos ofrecen hasta 1 Gbps, aunque se espera la pronta implementación de redes Ethernet inalámbricas para 10 Gbps [5].

Para alcanzar velocidades del orden de los multi-Gbps en los sistemas inalámbricos, se están realizando estudios en diversos escenarios de implementación, que operan a frecuencias portadoras extremadamente altas (*EHF, Extremely High Frequency*), cuyo rango oscila entre 10 y 300 GHz. Este rango de frecuencia se conoce como la banda de Ondas Milimétricas (MMW) la cual dispone de más ancho de banda en el orden de los GHz. Sin embargo, para implementar sistemas que operen en la banda de ondas milimétricas, se presentan algunos inconvenientes como: Mayor costo de equipos electrónicos, aumento de estaciones base a implementar, mayores requerimientos de potencia de transmisión, altas pérdidas de propagación, entre otros, por lo cual, los sistemas inalámbricos que operen en las bandas MMW requieren escenarios de implementación *indoor*, para proporcionar altas velocidades de transmisión en la prestación de servicios [6].

La convergencia entre los sistemas basados en fibra óptica y los sistemas no guiados, es decir, los sistemas RoF, se presenta como la solución más factible para el despliegue de redes de acceso que proporcionan movilidad y elevadas velocidades de transmisión de datos, en donde se permitirá a los usuarios finales acceder a una serie de contenidos, o servicios, de acceso inalámbrico que satisfagan su creciente demanda de ancho de banda. De esta forma, los sistemas RoF que operan en la banda MMW garantizan la sinergia adecuada entre el medio óptico e inalámbrico, y se plantean como una solución prometedora para el despliegue de redes que puedan brindar grandes anchos de banda [4].

1.2.1 ARQUITECTURA DE UN SISTEMA RoF

Un sistema RoF típico opera en la banda MMW [6], y su funcionamiento consiste en la transmisión de señales RF entre una estación central (CS, *Central Station*) y múltiples estaciones base (BS, *Base Station*), a través de fibra óptica. Los procesos eléctricos, tales como la generación de la señal RF, modulación y demodulación, multiplexación y demultiplexación, codificación y decodificación, filtraje, entre otros, son centralizados en la CS, mientras que las BS sólo se encargan de la conversión eléctrica/óptica, es decir, su configuración puede ser muy simple y es independiente del formato de modulación o protocolo, lo cual permite reducir el costo del sistema, y simplifica la operación y mantenimiento del mismo. Las BS se conectan con los diferentes terminales inalámbricos que están en su zona de cobertura [23]. En la Figura 1.12 se aprecia una arquitectura general de un sistema RoF.

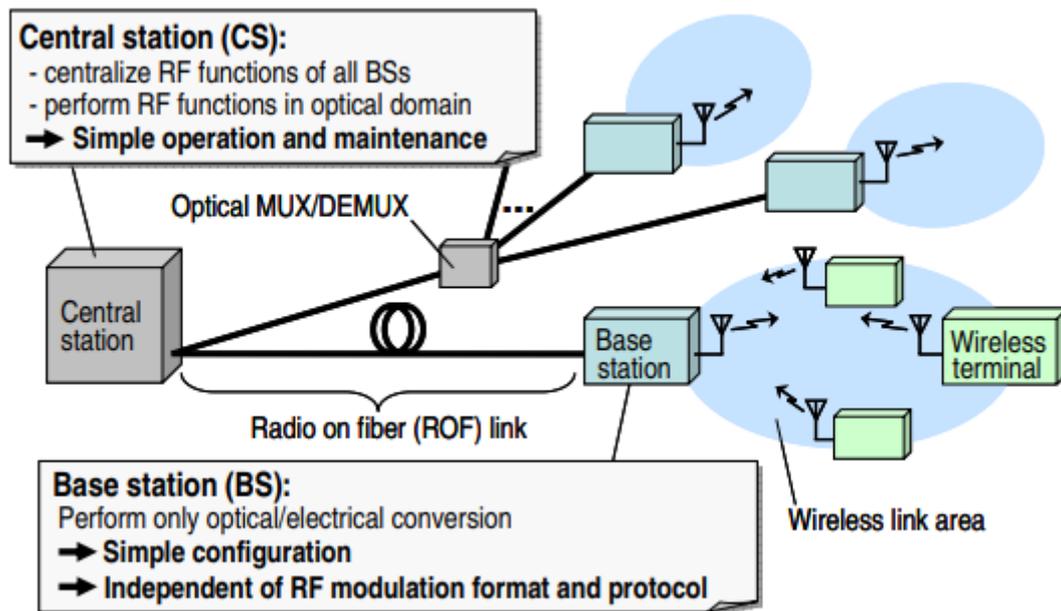


Figura 1.12. Arquitectura general de un sistema RoF [23].

En la arquitectura planteada, es posible definir cinco elementos dentro de un sistema RoF: Estación central, canal óptico, estación base, canal inalámbrico y terminal móvil.

La CS, además de generar e interpretar la señal eléctrica MMW, debe adecuar dicha señal hacia la fibra óptica para el enlace de bajada, como también, detectar la señal óptica del enlace de subida.

En el canal óptico existen algunas no linealidades que se presentan en forma de distorsiones estimuladas, como la SRS (*SRS, Stimulated Raman Scattering*) la cual genera un desplazamiento en frecuencia causado por la dispersión de la luz incidente al interactuar con las vibraciones de los átomos del material. Otra no linealidad que presenta la fibra óptica es el efecto óptico Kerr, que se genera a partir de la variación del índice de refracción del material a causa de un campo electromagnético aplicado. La dispersión estimulada causa variaciones en la intensidad de la señal, mientras que el efecto Kerr genera un desplazamiento de fase. Para reducir los efectos de las no linealidades, se puede hacer uso de fibras diferentes para los enlaces ascendente y descendente [24].

La BS se encarga únicamente de la conversión opto-eléctrica y viceversa; en el enlace de bajada deberá implementarse un fotodetector para poder transmitir la señal MMW hacia el terminal inalámbrico, mientras que en el enlace de subida se debe realizar un proceso de modulación óptica a la señal MMW recibida del terminal móvil.

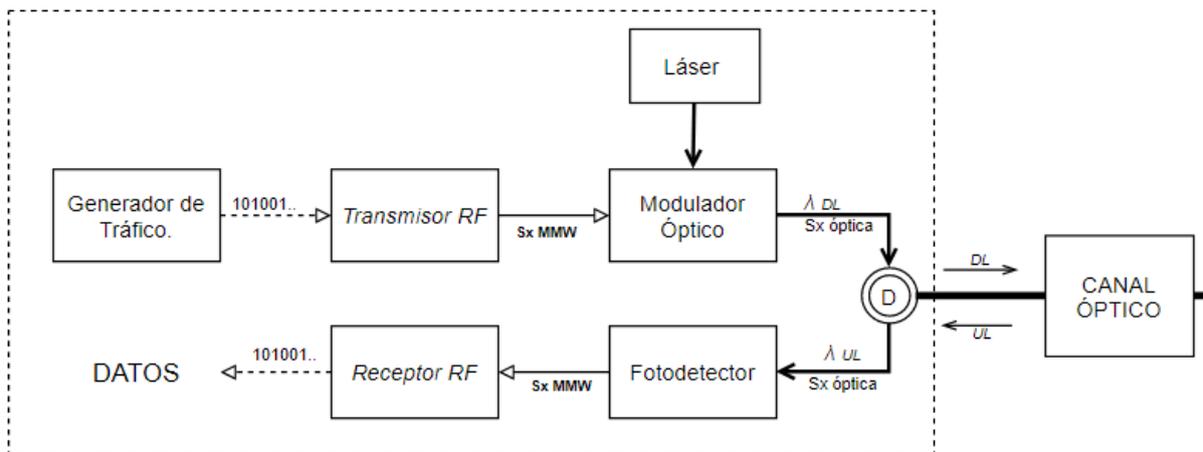
El canal inalámbrico permite la transmisión de las ondas MMW entre BS y terminal móvil. No obstante, la zona de cobertura de la BS se ve limitada a ambientes *indoor* debido a las altas pérdidas de espacio libre que se presentan dentro del canal al transmitir en frecuencias superiores a los 10 GHz.

El terminal móvil se comunica con la BS, a partir de un determinado estándar inalámbrico; en la Tabla 1.3 se describen algunos estándares que operan en la banda MMW [6].

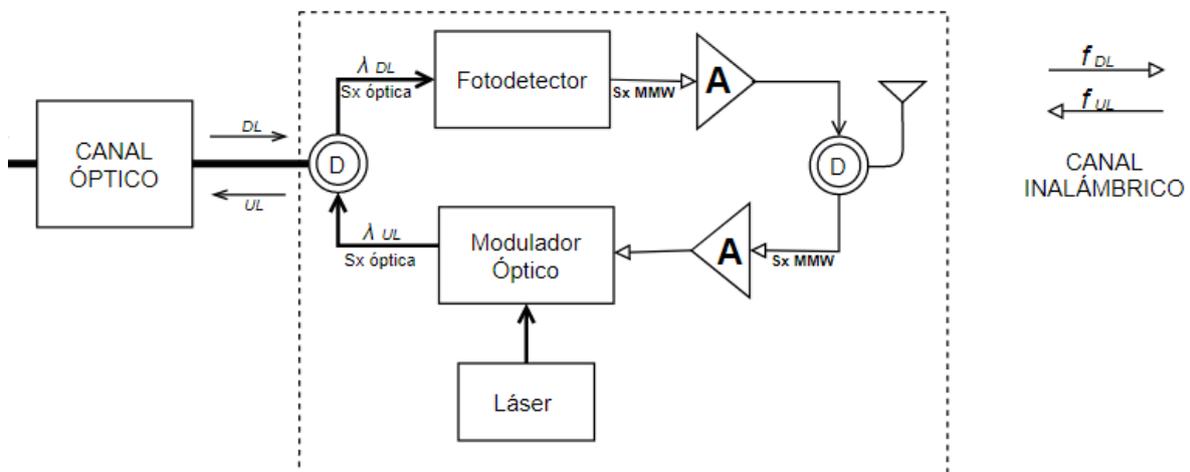
Tabla 1.3 Estándares inalámbricos que operan en la banda MMW.

Estándar Inalámbrico	Velocidad de Transmisión	Frecuencia	Alcance
Wireless USB	> 480 Mbps	10.6 GHz ¹	Corto
WiGig	7 Gbps	60 GHz ²	Corto
Wireless HD	25 Gbps	60 GHz	Corto
NR (5G)	> 10 Gbps	24 - 52 GHz ³	Corto

En la Figura 1.13 se aprecia un esquema detallado de la arquitectura de un sistema RoF que opera en la banda MMW.



(a)

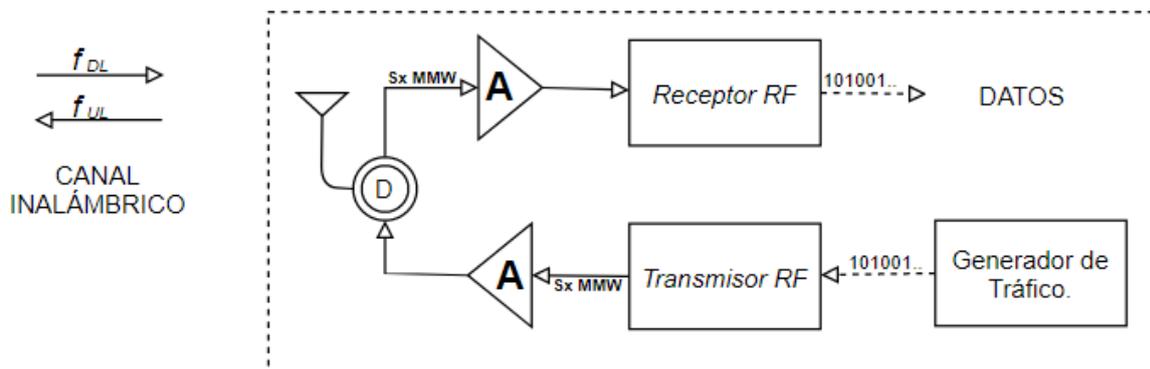


(b)

¹ El estándar Wireless USB opera en un rango de frecuencias entre 3.1 GHz y 10.6 GHz.

² El estándar WiGig también opera en frecuencias de 2.4 GHz y 5 GHz.

³ El estándar 5G también opera en un rango de frecuencias entre 0.8 GHz y 3.6 GHz



(c)

Figura 1.13 Arquitectura de un sistema RoF. (a) Estación Central. (b) Estación Base. (c) Terminal Móvil.

En la CS de la arquitectura planteada, para el enlace de bajada, los datos digitales se convierten en señales eléctricas de alta frecuencia mediante el *transmisor RF*, el cual mediante una serie de procesos eléctricos tales como mapeo, modulación, filtraje, entre otros, transforma una cadena de bits en un conjunto de señales MMW. La señal MMW generada, se convierte en una señal óptica a través del modulador óptico; en el caso particular de las señales con frecuencias mayores a 10 GHz se hace necesario emplear un modulador externo, debido a los inconvenientes que presenta modular el láser directamente. Por otra parte, para el enlace de subida, la señal óptica que viene de las BS pasa por un fotodetector, que se encarga de generar la señal eléctrica MMW, la cual se convierte en datos digitales mediante los procesos eléctricos del *receptor RF*, tales como filtraje, demodulación, detección de símbolo, mapeo inverso, entre otros.

Como se mencionó anteriormente, para minimizar los efectos causados por las no linealidades de la fibra óptica, es posible hacer uso de enlaces de fibra diferentes tanto para la transmisión en el enlace de subida como en el enlace de bajada. En el enlace de bajada, la señal generada en la CS se transmite hacia la BS, y cuando existen múltiples estaciones base, se hace uso de un dispositivo pasivo denominado *Splitter*, el cual divide la señal óptica hacia las diferentes estaciones. En el enlace de subida, los enlaces de fibra óptica de diferentes BS llegan a un combinador óptico, para ser embotellados sobre un único enlace de fibra óptica hacia la CS.

En la BS, para el enlace de bajada, mediante el fotodetector la señal óptica se convierte en una señal eléctrica MMW, la cual se amplifica y se envía hacia una antena para su propagación; en el enlace de subida, la antena recibe las señales MMW que vienen desde los terminales móviles, luego se amplifican y se modulan ópticamente para ser enviadas por la fibra.

En el terminal móvil, para el enlace de bajada, la antena recibe la señal MMW desde la BS y mediante el *receptor RF* recupera la señal digital de información; para el enlace de subida, los datos que proporciona el móvil se adecúan a señales eléctricas MMW a través del *transmisor RF*.

En la arquitectura anteriormente planteada, es posible identificar dos procesos claves para la transmisión de información: El proceso eléctrico que corresponde a las funciones realizadas en los bloques *transmisor RF* y *receptor RF*, los cuales se encuentran en la CS y el terminal móvil; y el proceso óptico, que corresponde a las funciones relacionadas con la modulación óptica y la fotodetección, las cuales se realizan en la CS y las BS.

1.2.2. PROCESO ELÉCTRICO EN UN SISTEMA RoF

El proceso eléctrico en los sistemas RoF consiste básicamente en modular una determinada señal digital de datos en una señal eléctrica MMW, para la transmisión, y demodular una determinada señal MMW en una señal digital de datos, para la recepción. Lo anterior debe regirse a partir de las características del estándar inalámbrico empleado en el sistema de comunicación; normalmente los estándares inalámbricos que operan en la banda MMW (Véase Tabla 1.2) se implementan bajo técnicas de modulación digital multiportadora.

De igual forma, según lo estudiado en [11,25-27] los sistemas RoF se implementan comúnmente bajo sistemas de transmisión OFDM. En la Figura 1.14 se propone un esquema general del proceso eléctrico en un sistema RoF.

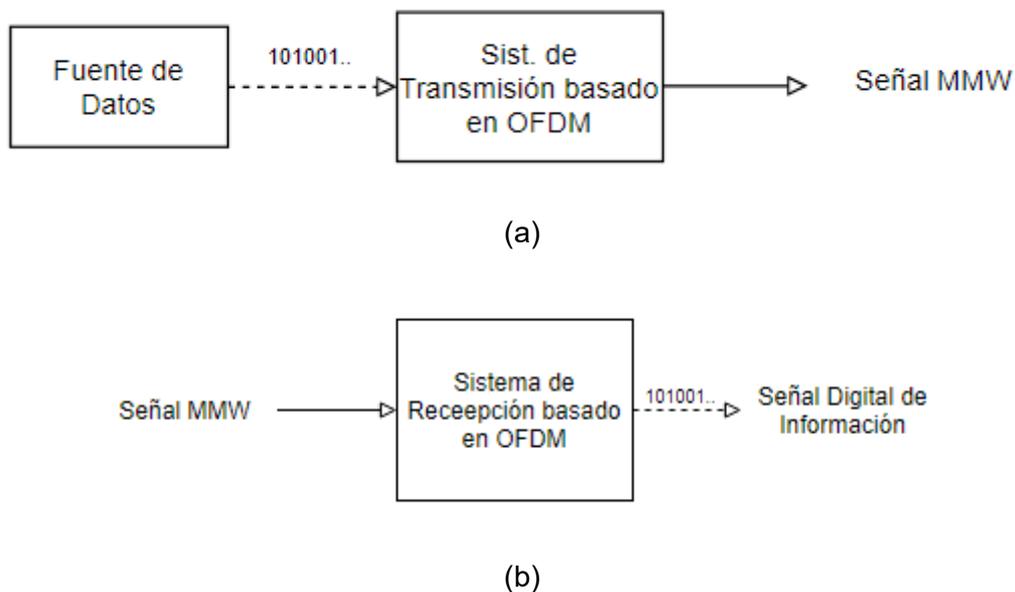


Figura 1.14 Esquema general del proceso eléctrico típico de un sistema RoF operando en la banda MMW. (a) Transmisor (b) Receptor.

En la figura anterior, se observa que el proceso eléctrico de un sistema RoF equivale al realizado por un sistema de transmisión basado en modulación multiportadora OFDM, por lo cual, se hace necesario realizar un estudio en torno a los sistemas OFDM, para lograr identificar los procedimientos involucrados en la conversión de la señal digital de datos en una señal RF y viceversa.

1.2.2.1 MODULACIÓN MULTIPORTADORA OFDM

OFDM es una técnica de modulación comúnmente utilizada en los sistemas inalámbricos, que surge para compensar los inconvenientes generados por un medio dispersivo, de igual

forma, existe la implementación en sistemas cableados, la cual se denomina Multitono Discreto (DMT, *Discrete MultiTone*). Los sistemas que usan OFDM presentan algunas ventajas como: Gran eficiencia espectral, elevadas tasas de transmisión y robustez ante medios de carácter hostil. Hoy en día, la técnica de transmisión/modulación OFDM ha sido implementada e incluida en diversos estándares de telecomunicaciones, tales como: 5G, ADSL, LTE, WiMAX, WLAN, sistemas de radiodifusión de Audio (DAB), sistemas de radiodifusión de televisión (DVB-T, DVB-T2), sistemas de radiodifusión a equipos móviles por medio de una red híbrida terrestre – satelital (DVB-SH), entre otros [28].

OFDM es una técnica de modulación multiportadora, en donde se divide un determinado canal en múltiples canales, los cuales se denominan subportadoras, de forma que los bits a transmitir se dividen en flujos que se transmiten por cada canal; en lugar de hacer una transmisión tipo serie, el sistema divide los bits de entrada en bloques y los transmite en paralelo a través de las subportadoras. Debido a la ortogonalidad, OFDM se considera una técnica idónea para sistemas de radiodifusión debido a la robustez ante efectos como desvanecimiento, lo cual produce una ventaja sustancial en las comunicaciones inalámbricas: Mitigar efectos de la interferencia intersimbólica (ISI) debido a condiciones dispersas de multitrayecto, es decir, reducir la influencia del desvanecimiento por multitrayecto y hacer innecesaria una ecualización compleja en el receptor [29].

El concepto de OFDM, deriva de la multiplexación por división de frecuencias (FDM, *Frequency Division Multiplexing*), en donde se divide el ancho de banda total del servicio en diferentes canales banda estrecha, separados una banda de guarda entre sí, para la transmisión de información. Los inconvenientes de FDM resultaron ser la incapacidad de aprovechar el espectro de forma eficiente sin que se presentase Interferencia Interportadora (ICI, *Inter Carrier Interference*). Por su parte, OFDM se encarga de dividir el canal en múltiples canales banda estrecha ortogonales entre sí (Véase Figura 1.15), para evitar efectos de Interferencia InterSímbolo (ISI, *InterSymbol Interference*), ICI y aprovechar de forma eficiente el espectro [29].

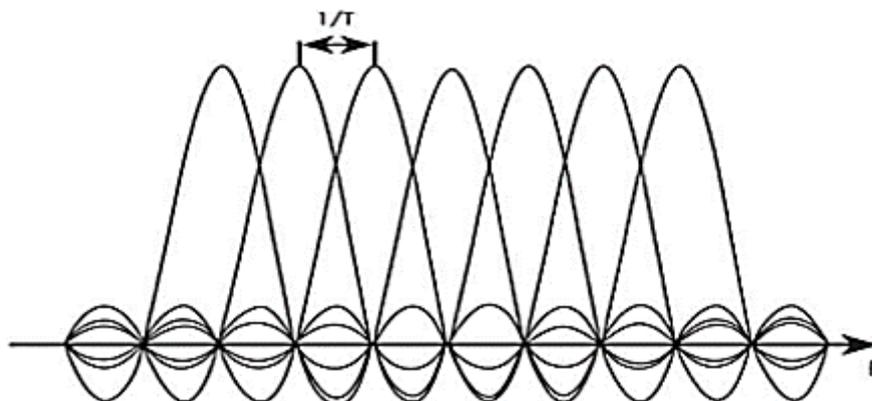


Figura 1.15 Principio de ortogonalidad [29].

En la ilustración se aprecia que los nulos de las portadoras adyacentes coinciden con los puntos máximos de cada portadora. Las portadoras deben estar sincronizadas entre sí, debido a que si se produce una alteración en las amplitudes se provoca distorsión en la señal.

En general, los sistemas OFDM presentan las siguientes ventajas [30]:

- Robustez ante desvanecimientos selectivos en frecuencia
- Gestión eficiente del espectro
- Eliminación de la ISI e ICI al hacer uso de un prefijo cíclico.
- Ecuación más sencilla que en sistemas de portadora única.
- Computacionalmente eficiente

1.2.2.1.1 Arquitectura de un sistema OFDM.

Un sistema de transmisión basado en OFDM se compone de un transmisor OFDM, un canal de comunicaciones y un receptor OFDM, tal como se aprecia en la Figura 1.16.

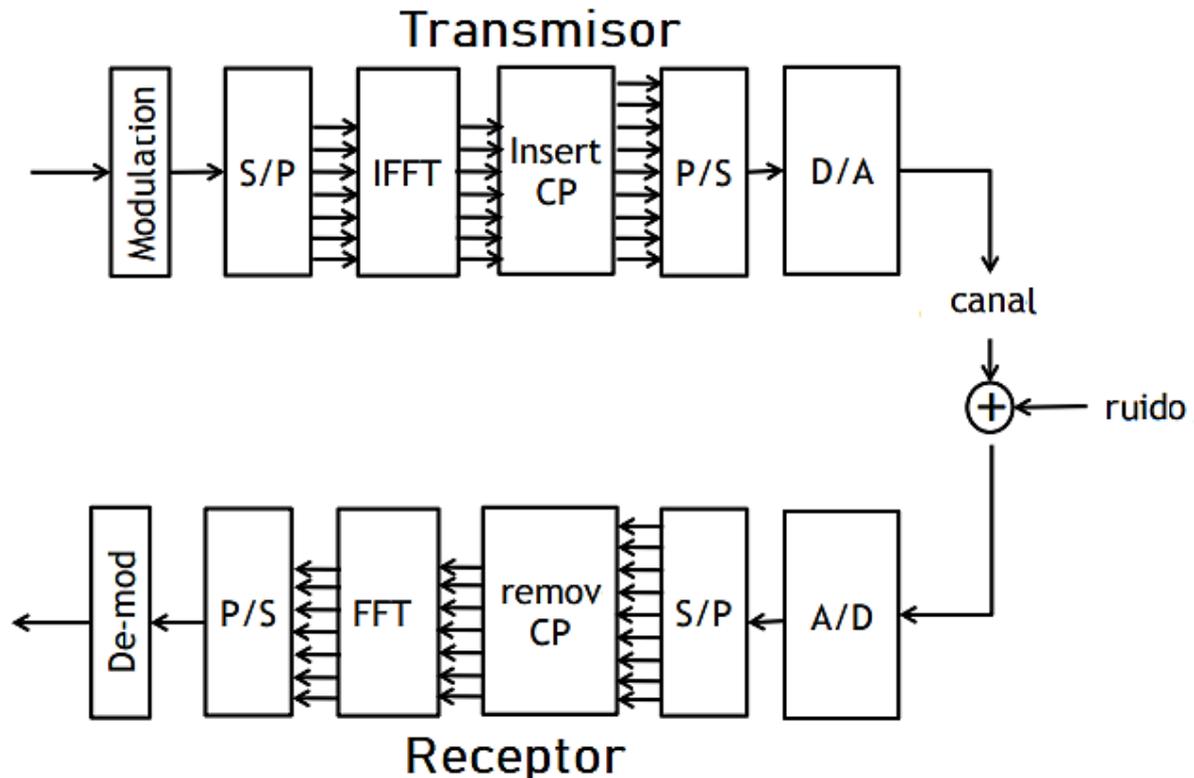


Figura 1.16. Arquitectura de un sistema OFDM [31].

En el transmisor, los datos de entrada son mapeados y modulados en banda base por medio de una técnica de modulación digital resultando una secuencia de símbolos complejos, los cuales se agrupan en múltiples flujos de símbolos paralelos mediante un convertidor Serie/Paralelo; posteriormente, cada flujo paralelo de símbolos resultantes pasan por el bloque IFFT (Transformada Inversa de Fourier en Tiempo Discreto) donde se obtiene una señal discreta en el dominio del tiempo; a esta señal se le inserta un intervalo de guarda a fin de evitar Interferencia Inter Símbolo por la dispersión del canal; luego, se convierte en una señal continua en el dominio del tiempo a través del convertidor digital / analógico (DAC); finalmente, se realizan los procesos de filtrado a la señal analógica, los cuales le asignan una portadora RF, y se transmite a través del medio.

El canal de comunicaciones de un sistema OFDM puede ser inalámbrico, alámbrico u óptico. Normalmente, los sistemas de transmisión OFDM son desarrollados para sistemas inalámbricos debido a las condiciones multitrayecto que se presentan. Mientras que, para

sistemas alámbricos como el cobre, cable coaxial y par trenzado, el sistema se denomina DMT. Por su parte, para los sistemas ópticos, OFDM se presenta como una solución alternativa y eficaz para el despliegue de redes de acceso que busquen proporcionar grandes velocidades de datos [26].

En el receptor, la señal RF recibida del canal es ecualizada a través de una serie de filtros y convertida en forma digital por medio del convertor analógico / digital ADC; luego, la señal resultante se agrupa en múltiples flujos paralelos mediante el convertor Serie/Paralelo, luego se elimina el intervalo de guarda insertado en transmisión, y los flujos paralelos restantes son demodulados a través del componente FFT (Transformada de Fourier en Tiempo Discreto); los flujos de símbolos resultantes pasan por un convertor paralelo serie para obtener la secuencia de símbolos en serie, la cual es interpretada, mediante el mapeo inverso y un proceso de decisión, con el fin de tener una réplica de los datos transmitidos.

En la Figura 1.17 se ilustra el proceso particular de modulación banda base en un sistema OFDM.

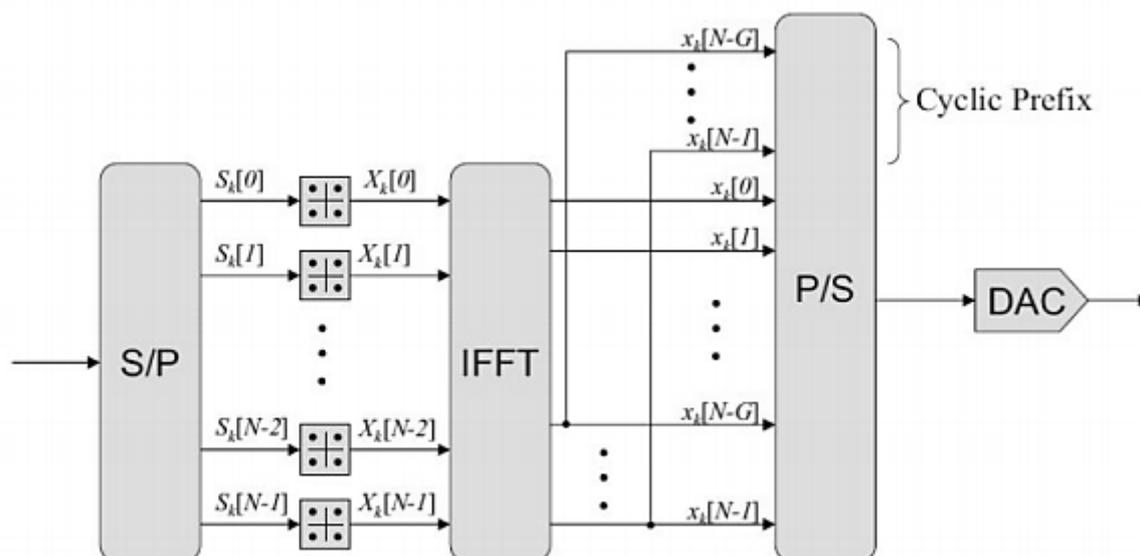


Figura 1.17 Transmisor OFDM banda base [11].

En la ilustración, es posible apreciar que los flujos de bits en paralelo se modulan en banda base a partir de técnicas cuyo diagrama de constelación se puede representar en el plano complejo; comúnmente se hace uso de las técnicas M-arias QAM y Modulación por Desplazamiento de Fase (M-PSK, *M-ary Phase-Shift Keying*), aunque se puede implementar cualquier esquema de modulación tipo M-ario, es decir, cualquier tipo de técnica multinivel.

1.2.3 PROCESO ÓPTICO EN UN SISTEMA RoF

En un sistema RoF convencional, el proceso óptico efectuado en el transmisor consiste en la modulación óptica de una determinada señal eléctrica RF para poder ser transmitida por un tramo de fibra, mientras que, para el caso del receptor, se debe realizar un mecanismo de conversión opto-eléctrica, con el fin de convertir la señal óptica en una señal eléctrica RF. A continuación, se describen los procesos involucrados en el transmisor y el receptor.

1.2.3.1 TRANSMISOR ÓPTICO

Considerando que los sistemas RoF operan comúnmente en la banda MMW, los procesos ópticos efectuados en el transmisor deben ser enfocados hacia la generación y transporte de señales MMW a través de la fibra. Según [32, 33], las tres técnicas de generación y transporte de ondas MMW más utilizadas y que presentan mejor desempeño en los sistemas RoF son:

- **Heterodinación óptica**

En esta técnica, una señal MMW es generada debido a la interacción de dos señales ópticas con longitudes de onda diferente, con un dispositivo fotodetector en un mismo instante de tiempo; la frecuencia de la señal MMW generada corresponde a la longitud de onda de separación de las señales ópticas incidentes, así mismo, es posible generar señales eléctricas de frecuencias cercanas al rango de los THz, limitándose únicamente por el ancho de banda del fotodetector. La principal desventaja de la heterodinación óptica, es la gran cantidad de ruido de fase que se presenta debido al choque entre dos señales ópticas, cuyas fases no se encuentran correlacionadas, y el cual es transferido a la señal MMW generada. A pesar de este inconveniente, algunos estudios realizados en los últimos años demuestran que se pueden generar señales MMW con bajos niveles de ruido de fase, al bloquear las fases de las dos ondas ópticas que inciden en el fotodetector [32, 33].

En la Figura 1.18 se ilustra un diagrama típico del método de heterodinación óptica. En este sistema, la intensidad del láser *Master* es modulada por una señal RF de referencia, produciendo una señal *láser* y una señal *láser de referencia*, las cuales se encuentran separadas una determinada frecuencia que corresponde a la de la señal MMW que se generará. Los datos de la CS son modulados en IF, y posteriormente modulados ópticamente por la señal *láser*. La señal resultante es enviada, junto a la señal *láser de referencia*, a través de la fibra hacia la BS, en donde las dos señales ópticas interactúan con el fotodetector, y se generan las señales MMW que son amplificadas y propagadas por la antena.

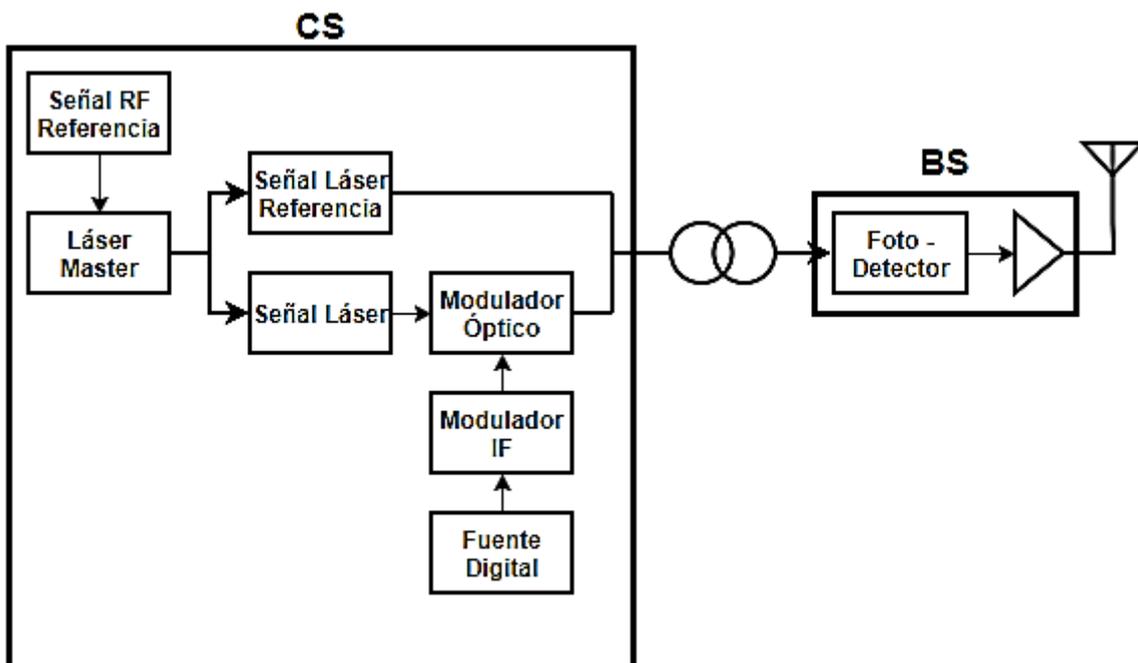


Figura 1.18. Heterodinación Óptica [33].

- **Up & down conversion**

En este método, en vez de transportar señales RF sobre la fibra óptica, se transportan señales IF. Por lo tanto, la conversión de señales IF a señales RF se debe efectuar a nivel de la estación base, donde la onda MMW se generará mediante un oscilador local. Sin embargo, los procesos de conversión IF - RF y RF -IF requieren de osciladores y mezcladores locales en cada estación base, lo que genera un costo extra en la implementación de la misma. Por otra parte, considerando el estrecho ancho de banda de las señales IF transportadas, los efectos de dispersión cromática de la fibra son casi despreciables. En la Figura 1.19 se aprecia un sistema que utiliza este método para la transmisión de información, que hace uso de moduladores ópticos externos.

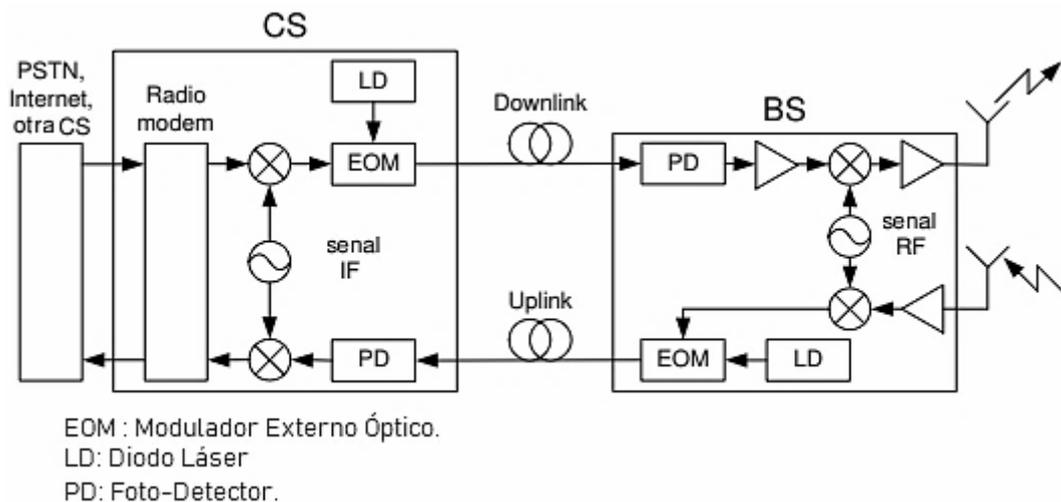


Figura 1.19. Sistema RoF basado en el método *Up & down conversion* [33].

- **Modulación externa.**

La modulación externa es ampliamente usada para la transmisión de señales RF de alta frecuencia (mayores a 10 GHz), y presenta ventajas significativas en comparación a otros métodos utilizados, debido a que es capaz de generar señales MMW con alta pureza espectral. Este método emplea moduladores externos de alta velocidad; los más empleados son los moduladores interferométricos de tipo Mach-Zehnder y los moduladores de electro-absorción (EAM, Electro-Absorption Modulators). Sin embargo, a pesar de la simplicidad de los moduladores externos, éstos presentan desventajas como las altas pérdidas de inserción, distorsión debido la no linealidad intrínseca de los mismos, alto consumo de potencia, entre otras [33].

Entre los métodos anteriormente descritos, la modulación externa es el mayormente utilizado en la implementación de sistemas RoF que operen en la banda MMW [33-35]. De esta forma, el transmisor óptico de un sistema RoF se puede definir de la siguiente manera:

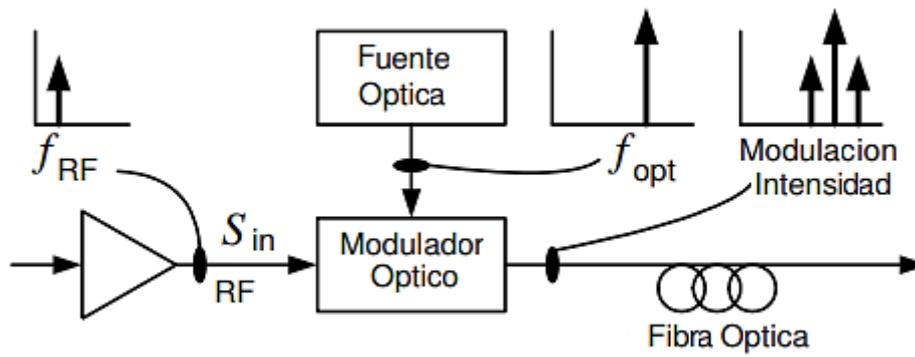


Figura 1.20. Transmisor óptico de un sistema RoF basado en modulación externa [33].

A continuación, se describen los dos tipos de moduladores externos más implementados en los sistemas RoF que operan en la banda MMW.

1.2.3.1.1 Modulador Mach Zehnder

El modulador Mach Zehnder se considera el modulador óptico más utilizado actualmente en el ámbito comercial; su funcionamiento se basa en el interferómetro MZI, y se compone de una estructura implementada sobre un sustrato de Niobato de Litio (LiNbO_3), tal como se muestra en la Figura 1.21.

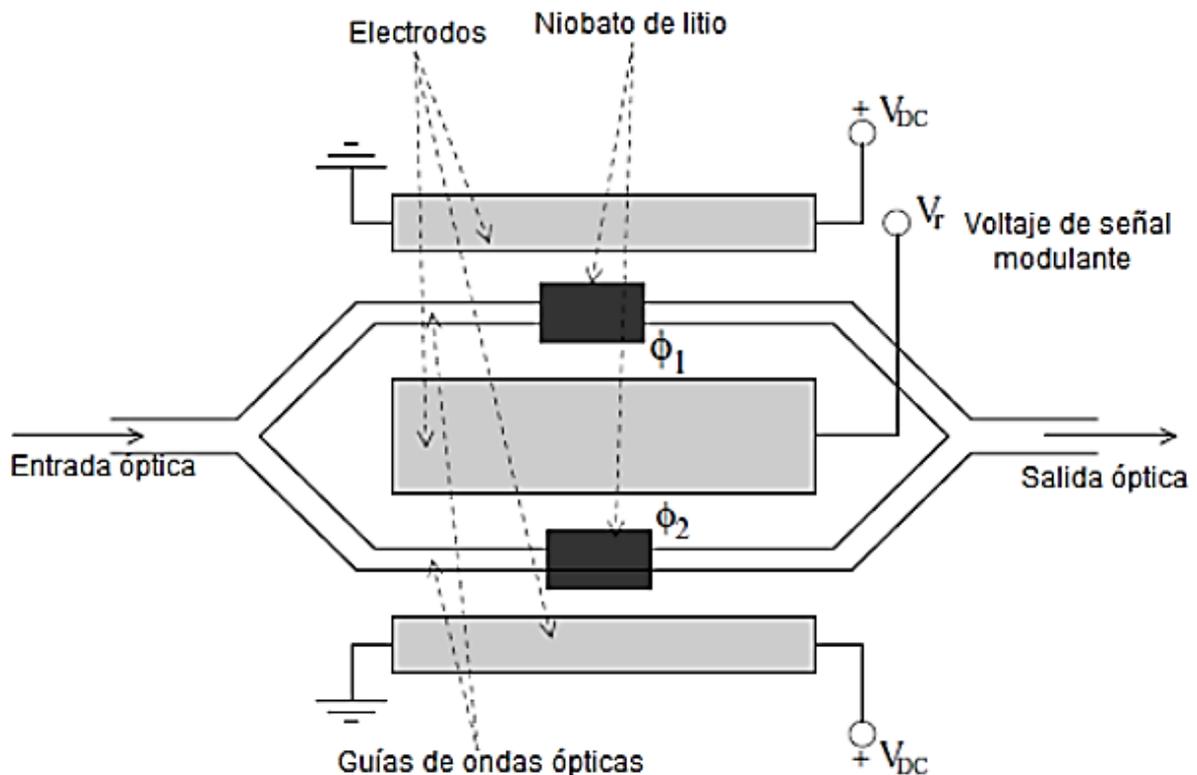


Figura 1.21. Modulador Mach Zehnder [36].

Dentro del modulador MZ, el haz de luz de entrada se divide en partes iguales entre dos rutas compuestas por guías de onda, las cuales se encuentran rodeadas por electrodos que están

siendo alimentados por una tensión de polarización; luego, cuando los haces de luz atraviesan los cristales ópticos (LiNbO₃) se provoca un cambio en el índice de refracción, debido al efecto de la polarización y por las propiedades electroópticas del cristal. Este cambio de índice de refracción genera una variabilidad en alguna de las propiedades de la señal óptica, tales como: amplitud, frecuencia, fase o polarización, lo que permite el proceso de modulación [35-36].

Al atravesar los cristales ópticos, nuevamente se combinan las señales ópticas, lo que causa un efecto de interferencia constructiva, siempre y cuando no exista un desplazamiento significativo de fase entre ambas señales, y permite reconstruir la señal original, pero si existe un desplazamiento significativo entre las fases se presenta un efecto de interferencia destructiva que hace imposible interpretar la señal original [36].

1.2.3.1.2 Modulador de Electro Absorción

El modulador de electro absorción se puede considerar un tipo de semiconductor, el cual modula un determinado haz de luz por medio de las variaciones del coeficiente de absorción que sufren los materiales del mismo, al ser alimentados por una tensión de polarización. Su funcionamiento es basado en el efecto Franz-Keldysh, en el cual ciertos materiales semiconductores absorben ciertas longitudes de onda debido a la variación de un campo eléctrico aplicado a sus extremos [36].

Los moduladores de electro absorción, se fabrican principalmente con materiales semiconductores, tales como: Arseniuro de Indio y Galio *InGaAs*, Arseniuro de Indio y Aluminio *InAlAs*. Además, presentan algunas ventajas como: Bajo consumo de potencia, fácil integración con otros semiconductores y con el diodo láser, tensión de polarización baja, tamaño reducido del dispositivo, entre otras [35, 36].

1.2.3.2 RECEPTOR ÓPTICO

El proceso óptico realizado en el receptor de un sistema RoF consiste en la conversión opto-eléctrica de una determinada señal óptica de entrada, para ser convertida en una onda MMW.

En general, la conversión opto-eléctrica se realiza mediante el principio de fotodetección, el cual sucede cuando un haz de luz incide sobre un material semiconductor (los fotodetectores son dispositivos fabricados a partir de materiales semiconductores), provocando que los fotones sean absorbidos por los electrones de la banda de valencia del semiconductor, quienes ganan energía del fotón y se mueven hacia la banda de conducción del material, tal como se muestra en la Figura 1.22.

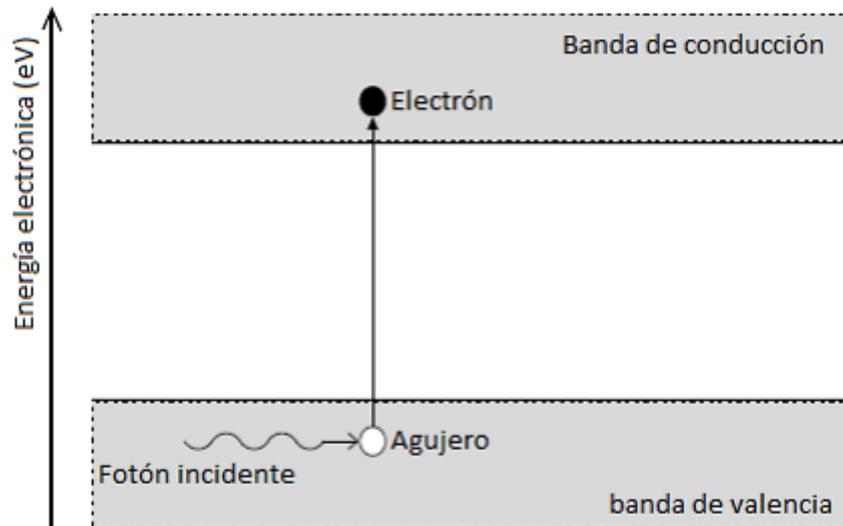


Figura 1.22. Principio de fotodetección [36].

Para redes ópticas tradicionales que emplean la detección directa, existen dispositivos de detección básicos como el fotodiodo PN, el cual se compone de una juntura tipo p-n, es decir un material tipo p y un tipo n, y el fotodiodo PIN, en donde un material *intrínseco* es situado entre un material tipo p y un material tipo n [36].

En resumen, un receptor óptico se puede definir de la siguiente manera:

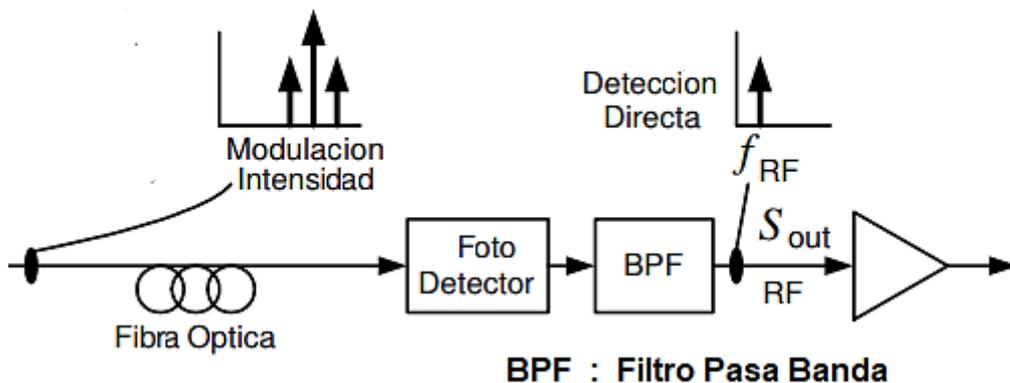


Figura 1.23. Receptor Óptico basado en el principio de Fotodetección [33].

1.3 MODULACIÓN M-ARIA EN AMPLITUD Y CUADRATURA

Como se mencionó en la sección anterior, el proceso eléctrico dentro de un sistema RoF se basa principalmente en el proceso de transmisión de un sistema OFDM, donde es ampliamente utilizada la técnica M-QAM para la modulación de los datos (Véase Figura 1.17). Además, considerando el enfoque de la investigación, en la presente sección se hace un estudio entorno a la técnica de modulación digital M-QAM.

El proceso de modulación digital consiste en la conversión de una secuencia de bits, que representa cierta señal de información, en formas de onda convenientes para ser transmitidas a través de un canal de comunicaciones; la demodulación, por su parte, es el proceso inverso, el cual se encarga de interpretar las señales recibidas del canal de comunicaciones en una determinada secuencia de bits. La modulación por amplitud y cuadratura, es una técnica de modulación digital donde la información está contenida en la amplitud y la fase de la portadora. Esta modulación se caracteriza por transmitir de forma simultánea dos portadoras dentro de un mismo canal, tales portadoras operan sobre la misma frecuencia, pero se encuentran desfasadas 90° entre sí, razón por la que es muy utilizada en sistemas de transmisión a grandes velocidades de datos, tanto en sistemas radio como en sistemas ópticos [37]. En la Figura 1.24 se presenta un ejemplo de la gráfica de una señal eléctrica modulada en 16-QAM, donde se aprecia las variaciones que se producen en la amplitud y en la fase para representar un determinado símbolo.

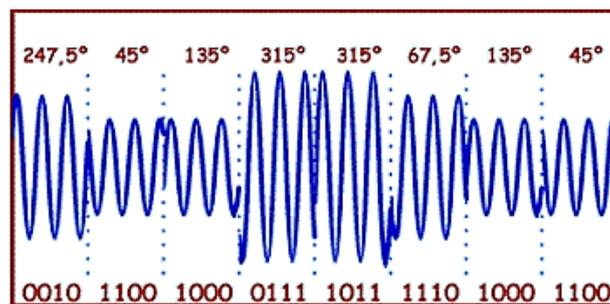


Figura 1.24. Ejemplo de señal modulada en 16 QAM [38].

1.3.1 SISTEMAS M-QAM

Un sistema de comunicaciones basado en M-QAM, se compone principalmente de un modulador M-QAM, un canal de comunicaciones y un demodulador M-QAM, tal como se aprecia en la Figura 1.25.

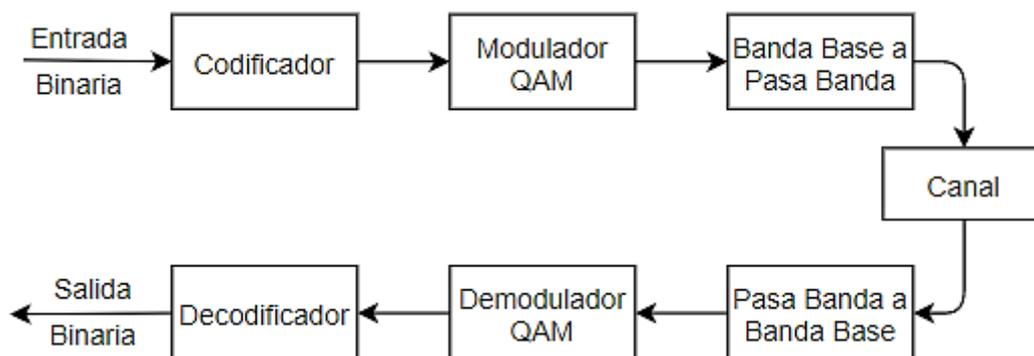


Figura 1.25 Sistema de comunicaciones basado en M-QAM [39].

1.3.1.1 MODULACIÓN EN UN SISTEMA M-QAM

El modulador M-QAM consiste fundamentalmente de dos etapas: Etapa banda base y etapa pasa banda. En la etapa banda base, una secuencia de datos que contiene una determinada señal de información y que está representada en una cadena de bits, es convertida en una secuencia de símbolos complejos por medio de un proceso de mapeo; los símbolos complejos

resultantes, representados por una componente en fase y otra en cuadratura, son transformados mediante un filtro conformador en formas de onda convenientes para la transmisión por el canal. En la etapa pasa banda, las señales en fase y cuadratura sufren una traslación en frecuencia mediante un proceso de convolución entre cada una de ellas y un respectivo factor multiplicativo, que normalmente equivale a señales senoidales de igual frecuencia, pero desfasadas 90° entre sí. En la Figura 1.26 se ilustra un diagrama de bloques de la generación de una señal QAM.

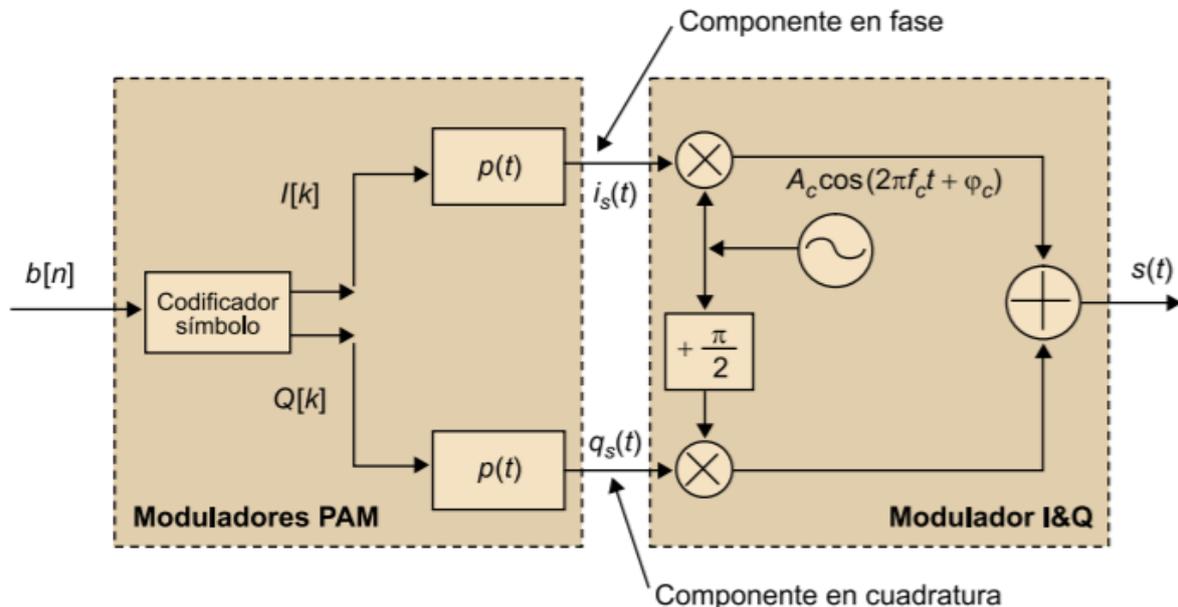


Figura 1.26 Modulador M-QAM. Tomado de [40].

La secuencia de bits discreta $b[n]$ representa una señal de información, tales bits se consideran equiprobables y estadísticamente independientes.

La señal digital ingresa al bloque *Codificador Símbolo*. Aquí, primero se agrupa la cadena de bits de entrada en conjuntos de K-bits; el valor de K depende del nivel de la modulación empleada y se relaciona de la siguiente forma:

$$K = \log_2 M \quad (1)$$

Luego, cada conjunto de K-bits se representa por un símbolo en el plano complejo, a este proceso se le denomina mapeo, y existen diferentes formas de llevarlo a cabo; sin embargo, el mapeo tipo Gray es el que se utiliza generalmente, debido a que garantiza una diferencia entre símbolos adyacentes de únicamente un bit, lo que significa que un símbolo errado corresponde solamente a un bit errado. Esta característica hace que este tipo de mapeo sea el más utilizado en los sistemas de comunicaciones digitales.

Según el nivel de modulación M-QAM, se genera un diagrama de constelación que representa los símbolos codificados. En la Figura 1.27 se muestra algunos diagramas de constelación M-QAM, que pueden ser obtenidos a partir del mapeo Gray.

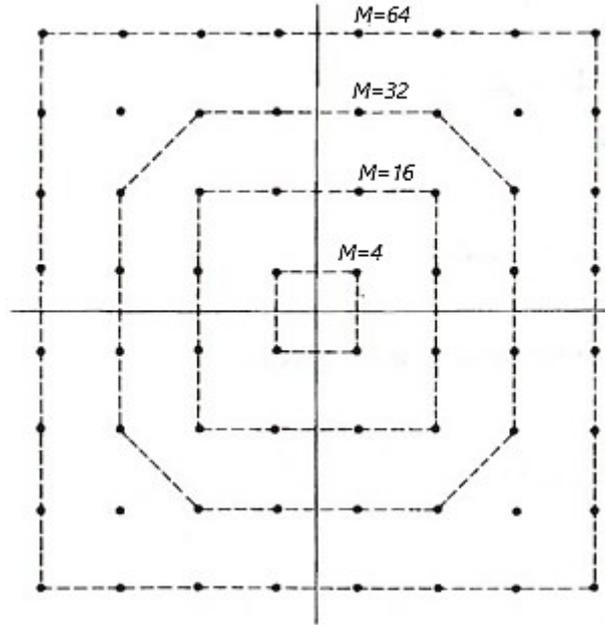


Figura 1.27 Diagramas de constelación QAM. Tomado de [41].

Al realizarse el mapeo a la secuencia de conjuntos de K-bits, surge como resultado dos secuencias de símbolos I_k y Q_k , que corresponden a los componentes en fase y cuadratura de cada símbolo complejo mapeado, respectivamente, como se indica en el siguiente procedimiento matemático:

$$a_k = i_k + jq_k \quad (2)$$

$$I_k = \sum_k i_k \quad (3)$$

$$Q_k = \sum_k q_k \quad (4)$$

Donde,

a_k , símbolo complejo k-ésimo resultante del proceso de mapeo.

i_k , componente en fase del símbolo complejo a_k .

q_k , componente en cuadratura del símbolo complejo a_k .

I_k , secuencia de símbolos en fase.

Q_k , secuencia de símbolos en cuadratura.

Las secuencias I_k y Q_k entran al filtro conformador, el cual se encarga de adaptarlos a formas de onda periódicas. El proceso resulta de convolucionar las secuencias de símbolos por formas de ondas $p(t)$, que normalmente son de tipo RRC (Raíz Cuadrada de Coseno Alzado). La salida del filtro, por lo tanto, será dos formas de onda $i_s(t)$ y $q_s(t)$, en el dominio del tiempo, y de carácter periódico y ortonormal, que se denominan señales en banda base, tal como se muestra a continuación:

$$i_s(t) = \sum_k i_k p(t - kT_s) \quad (5)$$

$$q_s(t) = \sum_k q_k p(t - kT_s) \quad (6)$$

Donde,

$i_s(t)$, señal en fase, en banda base.

$q_s(t)$, señal en cuadratura, en banda base.

$p(t - kT_s)$, filtro conformador representado por un conjunto de funciones ortonormales entre sí, y que se encuentran desplazadas un periodo T_s que corresponde al periodo de símbolo.

Las señales en banda base se cargan sobre una portadora, de un valor considerablemente mayor, y luego se envían a través del canal. En la Figura 1.26 se aprecia que tanto la señal en amplitud $i_s(t)$ como la señal en cuadratura $q_s(t)$ se modulan sobre la misma frecuencia portadora f_c , pero desfasadas entre sí. Este proceso se denomina modulación en etapa pasa banda, en donde la señal en amplitud $i_s(t)$ se multiplica por un factor $A_c \cos(2\pi f_c t + \varphi_c)$ y la señal en cuadratura $q_s(t)$ se multiplica por el mismo factor pero desfasado 90° , para luego ser enviadas sobre el mismo canal en una única señal $s(t)$, regida por la siguiente ecuación:

$$s(t) = i_s(t) A_c \cos(2\pi f_c t + \varphi_c) - q_s(t) A_c \sin(2\pi f_c t + \varphi_c) \quad (7)$$

Donde,

$s(t)$, señal QAM pasa banda.

1.3.1.2 CANAL DE COMUNICACIONES

La señal QAM pasa banda es transmitida por un canal de comunicaciones, el cual se compone de diferentes factores que afectan el comportamiento de la señal, en general, los sistemas de telecomunicaciones se modelan mediante canales con presencia de ruido, y en la mayoría de los casos, su modelamiento corresponde a canales con Ruido Aditivo Blanco Gaussiano (AWGN, *Aditive White Gaussian Noise*) [40]. En la Figura 1.28 se ilustra un esquema típico de modelo de canal en un sistema de telecomunicaciones.

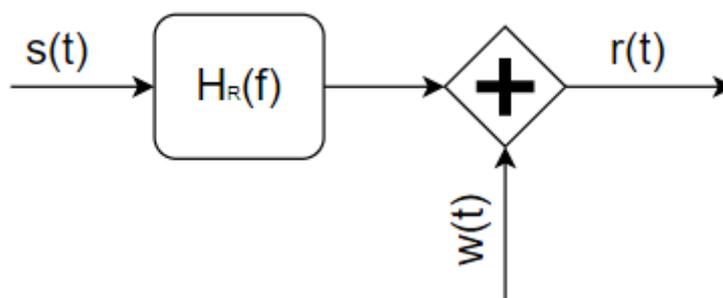


Figura 1.28 Modelo general de un canal de comunicaciones.

Considerando el diagrama de bloques anterior, la señal de salida del canal $r(t)$ está definida por la siguiente expresión:

$$r(t) = s(t) * h_R(t) + w(t) \quad (8)$$

Donde,

$h_R(t)$, función de transferencia del canal; en el caso particular de un canal AWGN, la función de transferencia se puede asumir como una señal impulso $\delta[t]$.

$w(t)$, proceso estocástico que representa el ruido introducido por el canal.

El ruido AWGN siempre se encuentra presente en un canal de comunicaciones y tiene como característica principal que no contempla selectividad ni en tiempo ni en frecuencia, además, se denomina blanco debido a que es un proceso estocástico cuya densidad espectral de potencia permanece constante para todo rango de frecuencias, se considera aditivo porque no degrada la señal de entrada al canal en ninguna de sus componentes sino que le agrega señales no deseadas, y su función de densidad de probabilidad corresponde a una distribución normal de media cero tal como se indica en la siguiente expresión:

$$w(t) \sim N(0, \sigma^2) \quad (9)$$

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (10)$$

En general, considerando un modelo de canal AWGN cuya entrada es la señal QAM pasa banda, a partir de la ecuación (8) la señal a la salida del canal se puede definir como:

$$r(t) = i_s(t) A_c \cos(2\pi f_c t + \varphi_c) - q_s(t) A_c \sin(2\pi f_c t + \varphi_c) + w(t) \quad (11)$$

1.3.1.3 DEMODULACIÓN EN UN SISTEMA M-QAM

La señal descrita en la ecuación (11), corresponde a la señal de entrada del demodulador M-QAM. En la Figura 1.29 se ilustra un diagrama en bloques de los elementos que lo constituyen.

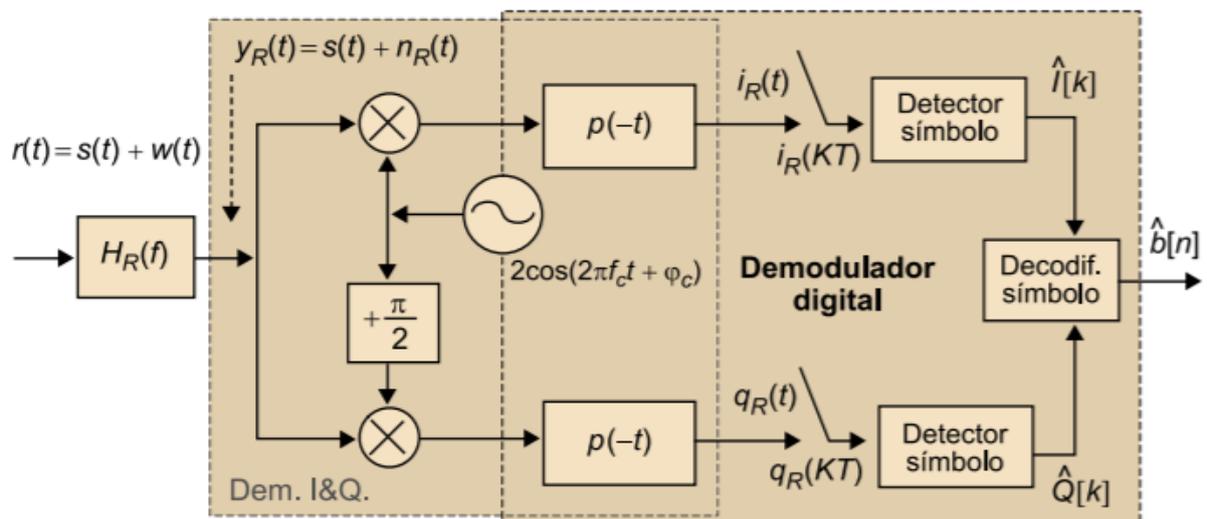


Figura 1.29. Demodulador M-QAM. Tomado de [40].

La señal de entrada al demodulador $r(t)$, se divide mediante un *Splitter* eléctrico en dos señales $r(t)$ idénticas, con el fin de recuperar la información contenida tanto en fase como en cuadratura, cada una de ellas sobre portadoras f_c , por lo que es necesario ponerlas en banda base; dicho procedimiento se realiza, multiplicando cada señal $r(t)$ por dos señales senoidales, desfasadas 90° entre ellas, y que operen sobre la misma portadora f_c , tal como se indica a continuación:

$$r_i(t) = r(t) 2 \cos(2\pi f_c t + \varphi) \quad (12)$$

$$r_q(t) = r(t) 2 \sen(2\pi f_c t + \varphi) \quad (13)$$

Donde,

$r_i(t)$, señal que representa la información contenida en fase.

$r_q(t)$, señal que representa la información contenida en cuadratura.

Reemplazando la ecuación (11) en las ecuaciones (12) y (13), las señales $r_i(t)$ y $r_q(t)$ quedan definidas por las siguientes expresiones:

$$r_i(t) = i_s(t) + i_s(t) A_c \cos(4\pi f_c t + 2\varphi) - q_s(t) A_c \sen(4\pi f_c t + 2\varphi) + n(t) \quad (14)$$

$$r_q(t) = q_s(t) + q_s(t) A_c \cos(4\pi f_c t + 2\varphi) - i_s(t) A_c \sen(4\pi f_c t + 2\varphi) + n(t) \quad (15)$$

Donde,

$n(t)$, proceso que surge de multiplicar el proceso estocástico de ruido AWGN $w(t)$ por un factor senoidal.

Las señales $r_i(t)$ y $r_q(t)$ resultantes, se pasan a través de un filtro pasa bajo (*LPF, Low Pass Filter*), que se encarga de remover los componentes de alta frecuencia, es decir, las expresiones que contienen a las señales con frecuencias centradas en $2f_c$.

La salida del filtro, equivale a las señales $\hat{i}_s(t)$ y $\hat{q}_s(t)$ banda base, tal como se expresa a continuación:

$$\hat{i}_s(t) = i_s(t) + n(t) \quad (16)$$

$$\hat{q}_s(t) = q_s(t) + n(t) \quad (17)$$

Las señales $\hat{i}_s(t)$ y $\hat{q}_s(t)$, debido a su naturaleza continua en el tiempo, deben ser convertidas a un conjunto de señales discretas mediante un proceso de filtraje acoplado, donde las señales sufren un proceso de convolución entre ellas mismas y formas de onda $p(-t)$, que satisfacen el principio de ortonormalidad, y posteriormente se someten a un muestreo con n muestras de periodo igual al periodo de símbolo T_s , generando como resultado dos secuencias discretas de símbolos \widehat{I}_k y \widehat{Q}_k . Tal como se indica a continuación:

$$\widehat{I}_k = I_k \delta[n - k] + n_0 \quad (18)$$

$$\widehat{Q}_k = Q_k \delta[n - k] + n_0 \quad (19)$$

En donde, n_0 es una secuencia de variables aleatorias $n_{0k} \sim N(0, \sigma^2)$ que resulta de los procesos de filtraje y muestreo que sufren el proceso estocástico $n(t)$; además, las expresiones de los símbolos k-ésimos de las secuencias representadas por las ecuaciones (18) y (19) se pueden plantear de la siguiente manera:

$$\widehat{i}_k = i_k + n_{0k} \quad (20)$$

$$\widehat{q}_k = q_k + n_{0k} \quad (21)$$

En general, las secuencias \widehat{I}_k y \widehat{Q}_k corresponden a las componentes en fase y cuadratura de una secuencia de números complejos, cuyo valor k-ésimo se puede representar como:

$$\widehat{a}_k = \widehat{v}_k + j\widehat{q}_k \quad (22)$$

Donde,

\widehat{a}_k , símbolo complejo k-ésimo recibido.

El componente *Detector de Símbolo*, se encarga de comparar cada símbolo \widehat{a}_k resultante del proceso de muestreo, con un conjunto de símbolos umbrales preestablecidos; lo anterior con base en un determinado criterio de decisión.

El criterio de decisión normalmente aplicado es el de mínima probabilidad de error o distancia mínima, el cual determina el símbolo de referencia que se encuentre más cercano geoméricamente al símbolo interpretado, es decir, determinar un valor d_k que satisfaga la siguiente condición:

$$\min \{|\widehat{a}_k - d_k|\} = d_{min} \quad (23)$$

Donde,

d_k , valor del símbolo de referencia más cercano geoméricamente al k-ésimo símbolo recibido a_k .

Finalmente, los símbolos recibidos serán decodificados para así tener una réplica $\widehat{b}[n]$ de la secuencia de bits original. Lo anterior, mediante un proceso de mapeo inverso, en el cual, un determinado símbolo que se encuentra codificado en Gray es convertido en un conjunto bits.

Por otra parte, la calidad del sistema de transmisión digital se determina normalmente por medio de la tasa de error de bit (BER, Bit Error Rate), el valor requerido de esta medida que garantiza una correcta recuperación de los datos digitales varía según tipo de sistema de comunicaciones; en general la tasa de error de bit es la relación entre la cantidad de bits errados recibidos y la cantidad de bits transmitidos, no obstante, existe una estimación matemática del cálculo de la probabilidad de error de bit, o de símbolo, de forma teórica para un sistema M-QAM.

1.3.2 PROBABILIDAD DE ERROR DE SÍMBOLO

En esta sección, se expone acerca de la probabilidad de error de símbolo en un sistema M-QAM modelado con un canal AWGN. La probabilidad de error de símbolo es una medida matemática, la cual representa una expectativa teórica de la ocurrencia promedio de un error en un sistema de comunicaciones. Un error en la transmisión ocurre cuando el símbolo detectado en un instante determinado no corresponde al símbolo transmitido en ese mismo instante de muestreo. Teniendo en cuenta que en el transmisor la señal mapeada obedece a codificación Gray, los diagramas de constelación son de tipo rectangular, y cada símbolo mapeado tiene asociada una región de decisión. En la Figura 1.30 se ilustra un diagrama de constelación de 16-QAM y sus respectivas regiones de decisión.

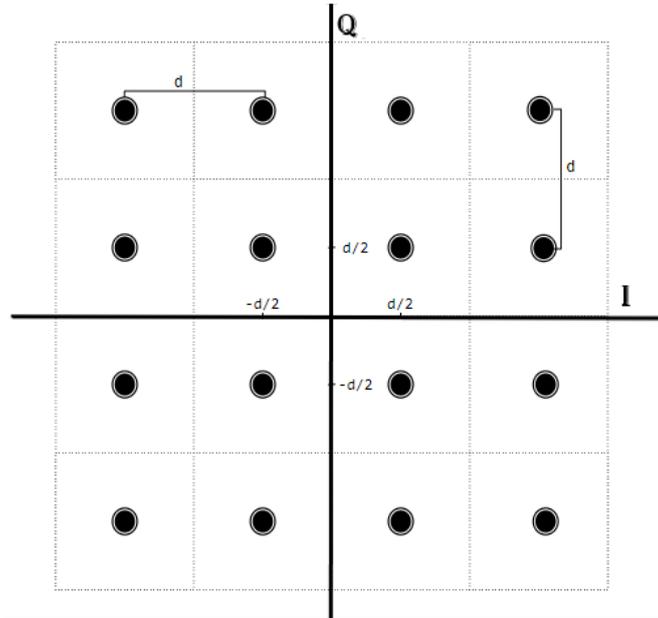


Figura 1.30. Regiones de decisión de la constelación 16-QAM.

En general, un error ocurre cuando uno de los símbolos recibidos se ubica fuera de su respectiva región de decisión, confundiendo con un símbolo adyacente. De esta forma, considerando el símbolo complejo \hat{a}_k recibido de la expresión (22), se define el evento "error de símbolo en el sistema" $\{\varepsilon_s\}$ de la siguiente manera:

$$\{\varepsilon_s\}: \hat{a}_k \text{ no se encuentra en la región de decisión del símbolo } a_k \text{ (24)}$$

La ocurrencia de un error en el sistema está supeditada a la posible ocurrencia de un error en cualquiera de los símbolos del alfabeto, cuya longitud está definida por el nivel de la modulación M-QAM. Por lo tanto, la probabilidad del evento error $\{\varepsilon_s\}$ se calcula por medio del teorema de probabilidad total de un evento:

$$P\{\varepsilon_s\} = \sum_{k=1}^M P\{a_k\}P\{\varepsilon_s/a_k\} \text{ (25)}$$

Aplicando algunos conceptos de la teoría de la probabilidad a la expresión (25), es posible encontrar un término simplificado para la probabilidad de error de símbolo del sistema, tal como se muestra en la ecuación (26).

$$P\{\varepsilon_s\} = K(M) Q\left(\frac{d}{2\sigma}\right) \text{ (26)}$$

Donde el primer término corresponde a una constante que depende del nivel de modulación y se puede interpretar como el promedio de símbolos vecinos asociado a cada esquema de modulación, y el segundo corresponde a la función de error complementaria asociada a la función de densidad de probabilidad del ruido AWGN, la cual se encuentra en términos de la distancia entre símbolos adyacentes y la desviación estándar del ruido.

El valor de la constante $K(M)$ se puede relacionar en una fórmula matemática con el valor de M si el esquema obedece a una constelación de símbolos rectangular, es decir, que el valor

M tenga raíz cuadrada exacta; mientras que para los esquemas no rectangulares no es posible encontrar una ecuación simplificada. De igual forma, a partir de varios conceptos matemáticos enfocados a la teoría de la información, es posible encontrar una expresión de la relación señal a ruido SNR en términos de la relación $\frac{d}{\sigma}$, lo anterior, para definir la probabilidad de error de símbolo en términos de parámetros de medición típicos en un sistema de telecomunicaciones, en este caso la SNR , tal como se indica en la siguiente expresión:

$$P\{\varepsilon_s\} = 4 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}}\right) Q \left(\sqrt{\frac{3 SNR [linear]}{M-1}} \right) \quad (27)$$

En el Anexo A se encuentra la descripción detallada del proceso matemático realizado para encontrar la fórmula simplificada de la probabilidad de error de símbolo.

Finalmente, a partir de la ecuación (27) se hallan las expresiones para algunos esquemas de modulación M-QAM rectangular, como se indica en la Tabla 1.4.

Tabla 1.4. Probabilidad de error de símbolo para M-QAM rectangular.

Esquema M-QAM.	Bits por Símbolo.	Probabilidad de error de símbolo.
4-QAM (QPSK)	2	$P\{\varepsilon_s\} = 2Q(\sqrt{SNR[linear]})$
16-QAM	4	$P\{\varepsilon_s\} = 3Q\left(\sqrt{\frac{SNR[linear]}{5}}\right)$
64-QAM	6	$P\{\varepsilon_s\} = 3.5Q\left(\sqrt{\frac{SNR[linear]}{21}}\right)$
256-QAM	8	$P\{\varepsilon_s\} = 3.75 Q\left(\sqrt{\frac{SNR[linear]}{85}}\right)$

CAPÍTULO II: METODOLOGÍA DE DESARROLLO Y SIMULACIÓN

La presente investigación, como se ha mencionado anteriormente, surge a partir de una tesis de maestría, a nivel institucional [11], donde se diseñó un módulo RoF para la prestación de servicios móviles, y se integró a una red FTTH-GPON *Triple Play* convencional; lo anterior, desarrollado a través de la herramienta de simulación *OptSim*. En particular, el presente trabajo de grado pretende realizar un análisis a nivel físico de la técnica de modulación M-QAM sobre el módulo RoF diseñado en [11], integrado a un sistema FTTH-GPON, con base en las consideraciones de una metodología de desarrollo, la cual se propone según las metodologías usadas en [11, 42, 43] y con base en la metodología de equipos de telecomunicaciones [44].

Los procesos de simulación son muy importantes para el área de investigación, en especial, para el desarrollo y despliegue de sistemas de comunicaciones, debido a que ilustran el comportamiento del sistema en un ambiente software controlado, antes de su implementación en un escenario real. En el contexto de la presente investigación, se propone una metodología basada en la metodología empleada en [42], y que a su vez se rige a partir de los lineamientos fundamentales de la metodología de equipos de telecomunicaciones [44].

A continuación, se ilustra algunos procedimientos que conforman la metodología de simulación formulada en [42]:

1. Formulación del problema y plan de estudios.
2. Recolección y procesamiento de datos.
3. Definición de un modelo conceptual.
4. Formulación de un modelo de simulación.
5. Diseño de experimentos (pruebas).
6. Elaboración del programa de computador (implementación de escenarios de simulación).
7. Evaluación del modelo y de los parámetros estimados.
8. Validación del programa.
9. Análisis de los datos obtenidos con la simulación.
10. Obtención de resultados.
11. Documentación de resultados.

A partir de los procedimientos listados anteriormente, se propone una serie de pasos con el fin de diseñar y desarrollar el proceso de simulación que se pretende implementar en el presente trabajo de investigación, los cuales se listan a continuación:

Fase Inicial.

1. Definición de escenarios de simulación.
2. Definición de la herramienta de simulación.
3. Definición de los parámetros de evaluación del sistema.

Fase de requerimiento y diseño.

4. Definición de modelos conceptuales del sistema.

Fase de desarrollo

5. Caracterización de modelos físicos de red mediante la herramienta de simulación.

Fase de pruebas

6. Prueba de la red FTTH-GPON para servicios *Triple Play*.
7. Prueba del módulo RoF para servicio de Internet Móvil.
8. Prueba de la red FTTH-GPON para servicios *Quad Play*.

Fase de análisis.

9. Análisis de resultados.
10. Conclusiones.

En el presente capítulo se consigna el desarrollo de las tres primeras fases de la metodología de simulación propuesta. La *fase de pruebas* y la *fase de análisis*, por su parte, se desarrollan y documentan en el Capítulo III.

2.1 FASE INICIAL

En esta sección, se establecen algunas consideraciones iniciales que se deben plantear antes del proceso de simulación. En primera medida, se definen los diferentes escenarios de simulación, luego, se describe la herramienta de simulación, y finalmente, se plantean los parámetros de evaluación del sistema.

2.1.1 ESCENARIOS DE SIMULACIÓN

En concordancia con el objetivo general y los objetivos específicos del presente trabajo de grado, se proponen tres escenarios de prueba para el proceso de simulación, los cuales se listan a continuación:

Para el primer objetivo específico: *Caracterizar a nivel de simulación una red FTTH-GPON Triple Play*, se propone el escenario:

- CASO A: Arreglo de 1, 8 usuarios de una red FTTH-GPON *Triple Play*.

Para el segundo objetivo específico: *Analizar el comportamiento del módulo RoF empleando la técnica de modulación M-QAM a nivel de simulación*, se propone el escenario:

- CASO B: Arreglo de 1, 2, 4 y 8 usuarios de una red RoF, variando el esquema de modulación M-QAM, y el parámetro de distancia del enlace, para el valor de longitud de onda de operación más adecuado.

Para el tercer objetivo específico *Evaluar el desempeño a nivel físico de la red FTTH-GPON integrando el módulo RoF, para M-QAM, con base en los parámetros de desempeño OPM*, se propone el siguiente escenario:

- CASO C: Arreglo de 1, 2, 4 y 8 usuarios de una red FTTH-GPON *Quad Play*, variando el esquema de modulación M-QAM, y el parámetro de distancia.

2.1.2 HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN

2.1.2.1 HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN OPTSIM

OptSim es un entorno de modelamiento y simulación desarrollado por *Rsoft* [45], que soporta el diseño y la evaluación, a nivel físico, de sistemas de comunicaciones ópticos; está

compuesto por un paquete de simulación de sistemas, donde es posible la simulación de sistemas ópticos complejos con un alto grado de eficiencia y precisión, entre sus aplicaciones se destacan: redes DWDM/CWDM, sistemas RoF, redes AON, redes LAN ópticas, redes TDM, sistemas CATV analógico y digital, redes FTTH-PON, entre otros.

La herramienta interpreta un sistema de comunicaciones óptico como un conjunto de componentes interconectados entre sí, los cuales corresponden a elementos o dispositivos que se utilizan normalmente, a nivel físico, en el despliegue de redes ópticas. El entorno ofrece una extensa librería compuesta por componentes como: Transmisores, generadores de señal, fibras ópticas, moduladores/demoduladores, multiplexores/demultiplexores, filtros, amplificadores, entre otros. Además, permite la medición de parámetros como BER, factor Q, potencia, y demás parámetros que se encuentran asociados al diagrama del ojo, como también, permite ver el comportamiento de una determinada señal de información, ya sea digital, eléctrica u óptica, mediante analizadores de señal y de espectro.

Por otra parte, el entorno OptSim presenta dos métodos para la simulación: Modo bloque y modo muestra. En el modo bloque los datos de la señal de entrada se representan como un bloque de datos el cual pasa de componente a componente, mientras que para el modo muestra, los datos de la señal de entrada se representan como una única muestra que pasa entre los componentes en cada instante de tiempo.

Adicionalmente, la herramienta OptSim ofrece dos técnicas para la simulación de sistemas ópticos, las cuales se describen a continuación:

- Técnica de propagación espectral (SPT, *Spectral Propagation Technique*)

Es una técnica de simulación en el dominio de la frecuencia, donde las señales son propagadas como espectros de potencia, teniendo en cuenta únicamente las pérdidas y el ruido de los componentes, sin considerar los efectos no lineales de la fibra óptica. De esta manera, los espectros de la señal y los niveles de potencia pueden ser evaluados en cualquier punto de la red.

- Técnica de ancho de banda variable (VBS, *Variable Bandwidth Simulation*)

Es una técnica de simulación en el dominio del tiempo, donde las señales se propagan como muestras de tiempo sobre un ancho de banda que puede ser configurable por el usuario, lo que permite determinar su comportamiento en recepción. Esta técnica se caracteriza por presentar varias opciones de simulación, una opción denominada *VBS Loss Fiber Only* en donde solo se considera la atenuación del enlace, otra opción denominada *VBS Linear Fiber* en la que solo se considera los efectos lineales, y por último, la opción *Full VBS*, en la cual se consideran tanto los efectos lineales como los no lineales, siendo la estrategia de simulación más completa y confiable.

2.1.2.2 LIMITANTES DE LA HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN OPTSIM EN EL CONTEXTO DE LA INVESTIGACIÓN

A pesar de ser una herramienta de simulación muy robusta, en cuanto al análisis a nivel físico de los sistemas ópticos, presenta algunas limitantes importantes que deben ser tenidas en cuenta para la delimitación del proyecto. En primer lugar, es importante resaltar que la herramienta sólo permite el análisis del sistema para el enlace de bajada o *Downlink*, por lo

que los objetivos planteados deben supeditarse únicamente al enlace de bajada. En segundo lugar, cuando el modo de simulación empleado corresponde al modo muestra con la técnica *Full VBS* y tipo de simulación *Scan Run*, la variación del ancho de banda de la simulación incide en la estimación de parámetros, presentándose una mayor precisión en simulaciones con ancho de banda más estrecho.

En tercer lugar, un aspecto importante a considerar es el comportamiento de los sistemas de comunicación de datos que empleen moduladores y demoduladores M-QAM, donde la medición de los parámetros asociados al diagrama del ojo no es precisa debido a que la señal está constituida por dos señales, una que representa su componente en fase y otra que representa el componente en cuadratura, por lo que resulta difícil hacer un análisis físico exacto, sin embargo, la versión 2019.09 de OptSim considera un parámetro de medición, exclusivo de los demoduladores M-QAM-IQ, diferentes a los estimados por el diagrama del ojo, denominado: Magnitud del Vector de Error (*EVM, Error Vector Magnitude*). En cuarto lugar, es preciso resaltar que todos los elementos de medición de parámetros físicos que ofrece la herramienta, salvo los analizadores gráficos y los lectores de EVM, son únicamente para sistemas que empleen esquemas de modulación binario.

Además de lo anterior, otra limitante de gran importancia concierne a los sistemas basados en OFDM, en donde, al hacer uso de los módulos IFFT-OFDM y FFT-OFDM, exclusivos del modo muestra, se requiere una gran cantidad de recursos computacionales (CPUs) si se configuran con un número muy grande de subportadoras (mayor a 128 subportadoras).

Finalmente, cabe resaltar que la herramienta OptSim en su versión más reciente sólo permite caracterizar enlaces ópticos, por lo que en el contexto de esta investigación se modelará únicamente el canal óptico, mas no el enlace inalámbrico. No obstante, se espera en la próxima versión de la herramienta, un modelo de canal inalámbrico que represente celdas de corto alcance con características de 5G, para sistemas RoF.

2.1.3 PARÁMETROS DE EVALUACIÓN DEL SISTEMA

Los parámetros a evaluar dentro de los sistemas ópticos definidos en los escenarios de prueba, se proponen en concordancia con la literatura estudiada [42, 46 - 49], las limitaciones de la herramienta de simulación OptSim, y considerando los parámetros de Desempeño de Monitoreo Óptico (*OPM, Optical Performance Monitoring*), a nivel físico, estipulados en la recomendación ITU-T G.697 [46].

A continuación se hace una descripción de los parámetros definidos para llevar a cabo la evaluación del proceso de simulación, cabe resaltar que no todos los parámetros descritos son medibles en todos los sistemas ópticos que se pretenden simular, debido principalmente a las limitantes de la herramienta, donde sus componentes de medición se clasifican principalmente en dos grupos, según el esquema de modulación empleado en el sistema óptico, es decir, si se trata de esquemas multinivel o se trata de esquemas binarios.

2.1.3.1 Factor Q

El factor de calidad Q se define como la relación señal a ruido eléctrica que se mide en la entrada de un circuito de decisión en un receptor digital. Su medida está en función de las medias y varianzas de las intensidades de corriente en el decisor del receptor que

representan los niveles de los diferentes símbolos recibidos. Para sistemas que utilizan modulación binaria, la medida del factor Q se expresa en la siguiente ecuación:

$$Q[dB] = 20 \text{Log} \left(\frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 - \sigma_0} \right) \quad (28)$$

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

2.1.3.2 Tasa de error de bit (BER, *Bit Error Rate*)

La tasa de error de bit es un parámetro que evalúa la calidad de la información recibida en el sistema, y se representa mediante la relación entre el número de bits que presentan error y el número total de bits transmitidos en un determinado periodo de tiempo. Así mismo, su medida se puede expresar en términos del factor de calidad Q si se considera un sistema modelado bajo un canal AWGN, y que no emplee modulación multinivel, tal como se indica a continuación:

$$BER = \frac{1}{2} \text{erfc} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \quad (29)$$

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

2.1.3.3 Magnitud del vector de error

La magnitud del vector de error es una medida que evalúa la calidad de señales de telecomunicaciones que han sido moduladas digitalmente, especialmente para métodos de modulación multinivel, tales como M-PSK o M-QAM, los cuales son ampliamente implementados en redes WLAN, sistemas inalámbricos de banda ancha, y sistemas móviles de cuarta generación (4G, *4th Generation Mobile*) y quinta generación (5G, *5th Generation Mobile*) en donde se combinan con la modulación OFDM [47].

La medida de EVM corresponde básicamente al vector diferencia entre el vector que representa el símbolo demodulado o medido y el vector que representa al símbolo de referencia o símbolo transmitido, tal como se ilustra en la figura:

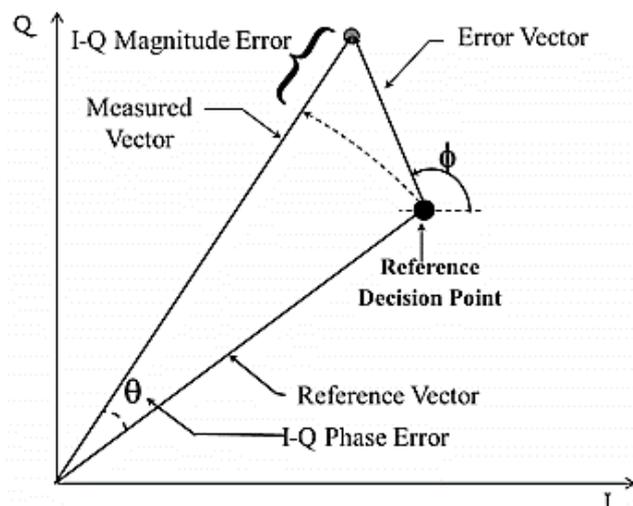


Figura 2.1. EVM dentro del plano complejo I-Q [48].

2.1.3.4 Diagrama del ojo

El diagrama del ojo es un esquema que ilustra la superposición de distintas combinaciones de unos y ceros que se transmiten sobre un canal en un periodo de tiempo determinado, lo cual permite observar ciertos parámetros y características que determinan la calidad de la señal, tal como se ilustra en la Figura 2.2.

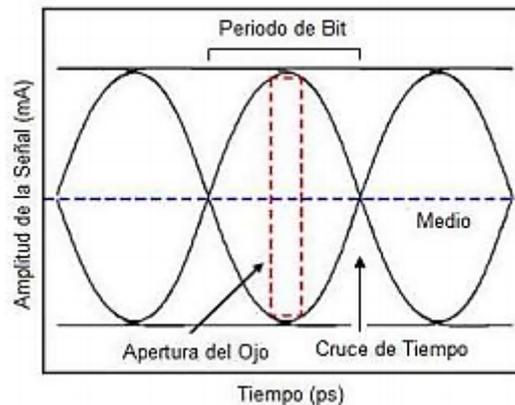


Figura 2.2. Parámetros del diagrama del ojo [49].

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

Así mismo, mediante el diagrama del ojo se pueden conocer algunas fuentes de degradación en del canal óptico, a partir de dos tipos de comportamiento; en primer lugar, si la apertura vertical es pequeña la calidad del sistema se ve comprometida por efectos como la ISI y el margen de ruido, en segundo lugar, si la apertura horizontal es pequeña la calidad del sistema se ve afectada por el *Jitter*. En la Figura 2.3 se muestra una figura donde se evidencian los anteriores conceptos.

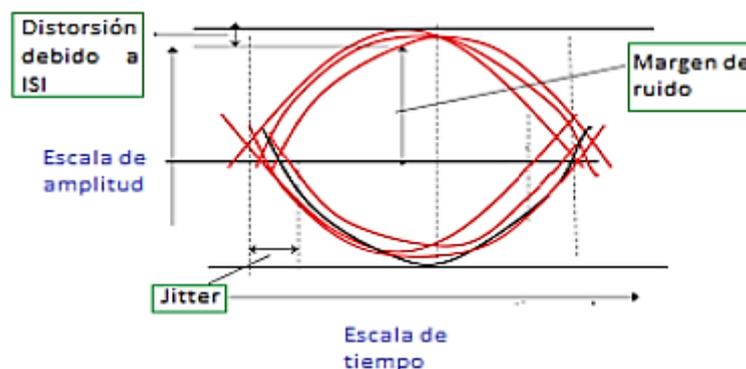


Figura 2.3. Efectos de distorsión, Jitter y margen de ruido [21].

2.1.3.5 Jitter

El Jitter es un parámetro que consiste en la desviación de fase de una señal digital que se propaga sobre un canal con respecto a su posición ideal en el dominio del tiempo, y se calcula en función de la desviación estándar de un histograma que contenga las diferentes formas de pulso transmitidas. El Jitter es un efecto no deseado que degrada la calidad del sistema,

debido a que puede generar efectos de ISI por el desplazamiento de fase que genera, haciendo que los pulsos se traslapen entre sí, y haciendo imposible, en algunos casos, el reconocimiento de la información digital en el receptor. En la Figura 2.4 se aprecia de forma gráfica el efecto del Jitter dentro del diagrama del ojo.

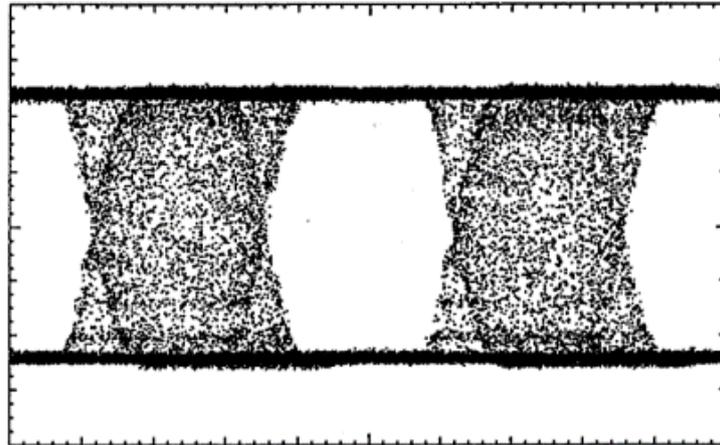


Figura 2.4. Efecto pronunciado de Jitter en el diagrama del ojo [21].

2.1.3.6 Potencia en recepción

El nivel de potencia medido en recepción es un parámetro que permite calcular la atenuación máxima producida por el enlace óptico a la señal óptica de información. En general, según [50] consiste en la substracción del valor de potencia transmitido con la atenuación máxima que presenta la fibra óptica, como se indica en la siguiente expresión:

$$P_{RX}[dBm] = P_{TX}[dBm] - A[dB] \quad (30)$$

El valor de la atenuación, equivale a todas las pérdidas que se presentan en el enlace debido a efectos lineales y no lineales de la fibra óptica, particularmente por efectos de reflexión y dispersión; las pérdidas ocasionadas por la reflexión se pueden considerar muy bajas, mientras que las pérdidas por distorsión, se pueden determinar por la siguiente ecuación:

$$P_{dispersión} = 3.86 (D_c * W * L * R)^2 \quad (31)$$

Donde,

$D_c \left[\frac{ps}{nm * Km} \right]$, coeficiente de dispersión cromática.

$W[nm]$, ancho espectral de la fuente de luz a -3dB.

$L [Km]$, longitud del enlace.

$R[bps]$, Tasa de bits.

2.2 FASE DE REQUERIMIENTO Y DISEÑO

En esta sección, se define el modelo conceptual del sistema característico que permita desarrollar los escenarios de prueba descritos anteriormente. Este sistema se compone de una red FTTH-GPON desplegada para servicios *Triple Play* y un módulo RoF para servicios móviles, dando como resultado una red FTTH-GPON para servicios *Quad Play*. El contexto de la simulación consiste en la estimación de los parámetros de evaluación del sistema definidos en la sección 2.1.3, a partir de un determinado modelo de red.

2.2.1 MODELO CONCEPTUAL DE LA RED FTTH-GPON TRIPLE PLAY

Para definir de forma precisa el modelo conceptual de la red, es importante describir de forma general las consideraciones de una red óptica pasiva, y el esquema general de un enlace óptico, como se aprecia en la Figura 2.5.

La Figura 2.6, por su parte, se muestra un esquema de red FTTH-GPON *Triple Play* general. El módulo de transmisión, genera una señal de vídeo y un tráfico de datos (VoIP e Internet), y los multiplexa por un único canal, a partir de una determinada topología de red. El receptor, finalmente interpreta las señales para el usuario final.

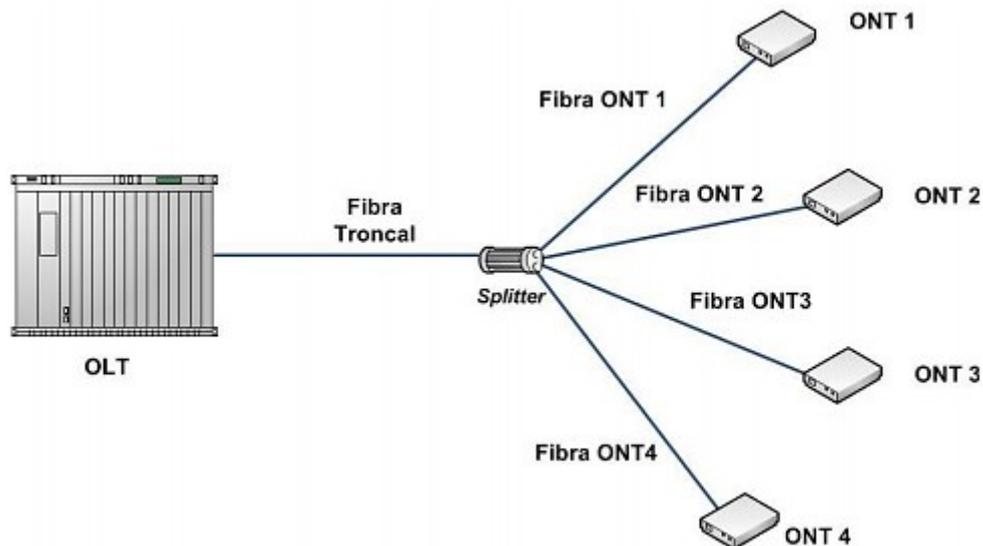


Figura 2.5 Escenario general de una red óptica pasiva [21].

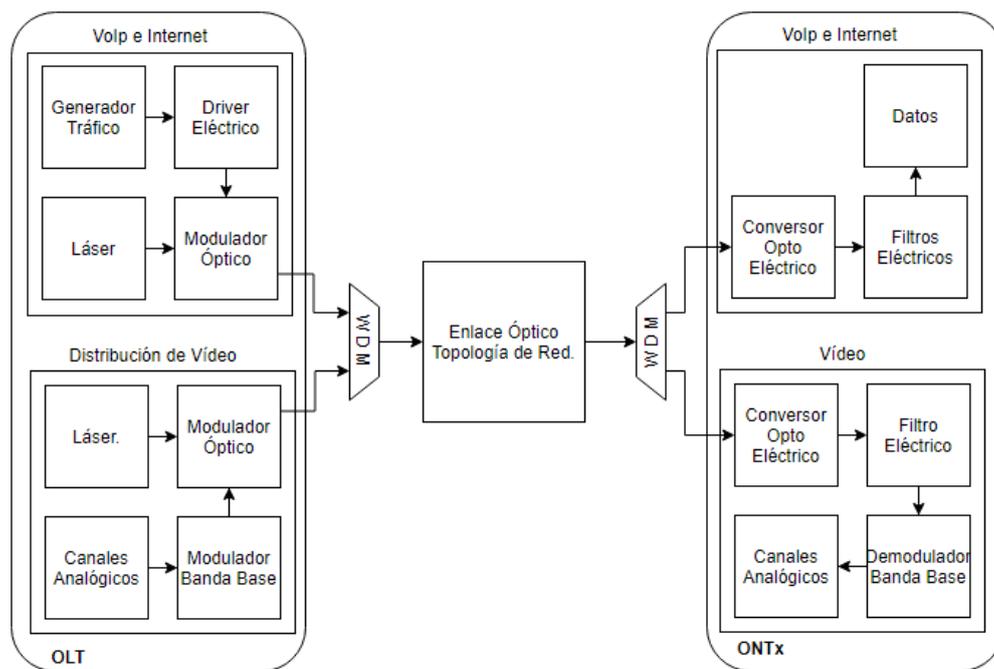


Figura 2.6 Diagrama general de una red FTTH-GPON Triple Play [21].

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en [24], la red FTTH-GPON presenta el mejor rendimiento con la topología de red en árbol, para la transmisión de servicios de Internet, VoIP y CATV Digital. En las Figura 2.7 y 2.8 se ilustra el modelo conceptual de la OLT y la ONT, respectivamente, del sistema que se pretende simular.

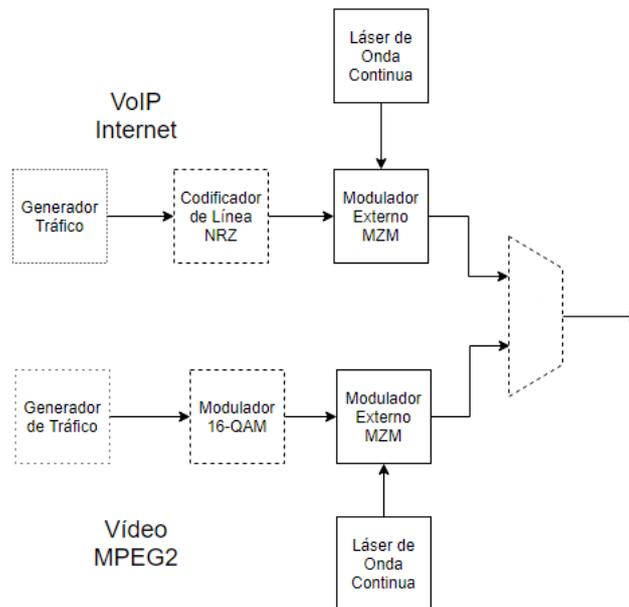


Figura 2.7. Modelo Conceptual del Terminal de Línea Óptica dentro de la Red FTTH-GPON *Triple Play*.

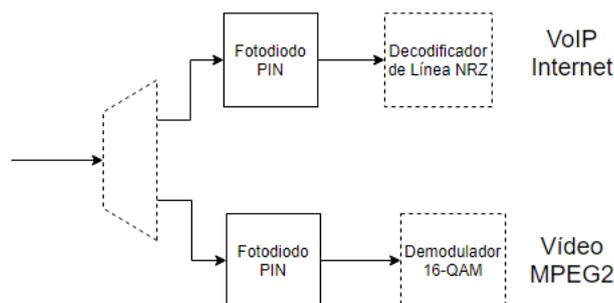


Figura 2.8. Modelo Conceptual del Terminal de Red Óptica dentro de la Red FTTH-GPON *Triple Play*.

En este modelo de red, los servicios *Triple Play* son proporcionados como la combinación de señales de Internet, VoIP y CATV Digital. Los servicios de Internet y VoIP operan de forma conjunta a una velocidad mínima de transmisión de 1.25 Gbps, se modulan en banda base mediante un codificador de línea, y se transmiten en la ventana de 1490 nm. La señal de vídeo, por su parte, corresponde a un sistema de Modulación digital por Portadora Única (*SCM, Single Carrier Modulation*) basado en 16-QAM que se transmite en la ventana de 1550nm. La escogencia de valores de las longitudes de onda de operación de los servicios descritos se hace con base en las consideraciones de la recomendación ITU-T G.984.1 y ITU-T G.984.5 [51-52]. A continuación, se describe cada módulo de la red FTTH-GPON *Triple Play* ilustrada en las Figuras 2.7 y 2.8, cuyos parámetros se establecen según los valores típicos de redes GPON *Triple Play* convencionales [11, 21, 51].

- **Topología de Red:**

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

- **Sistema de Transmisión:**

Servicio de VoIP e Internet:

- **Generador de tráfico:**
Velocidad de transmisión de datos 2.5Gbps, establecida con base en las velocidades típicas de *Downlink* que propone el estándar GPON.
- **Codificador de línea:**
Formato: *Non Return to Zero* (NRZ), definido con base en las consideraciones del estándar GPON.
- **Modulador Óptico:**
Tipo: Externo (*Mach-Zehnder*).

Servicio de video:

- **Generador de tráfico:**
Velocidad de transmisión de datos 0.8 Gbps, establecida con base en el formato MPEG-2.
- **Modulador Banda Base:**
Tipo: QAM. 16 símbolos, definido con base en las consideraciones del estándar de vídeo MPEG-2.
- **Láser**
Tipo: Láser de onda continua.
Longitud de onda: Desde 1291 nm hasta 1591 nm.
Potencia: 8 dBm.

- **Canal Óptico**

- **Fibra Óptica:**
Tipo: SMF-28 (Estándar ITU-T G.652)
Constante de atenuación: Función de la longitud de onda y el tipo de fibra.
Constante de dispersión: Función de la longitud de onda y el tipo de fibra.

- **Sistema de Recepción**

- **Filtro Óptico:**
Tipo: Bessel.
Orden: 2.
Ancho de Banda: Equivale a cuatro veces el valor de la velocidad de datos. (3.2 GHz para 0.8 Gbps; 5 GHz para 1.25 Gbps; 10 GHz para 2.5 Gbps).
Profundidad: 100 (Atenuación que presenta el filtro para todos los canales, excepto para el que le corresponde).

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

2.2.2 MODELO CONCEPTUAL DEL SISTEMA RoF

Según lo estudiado en la sección 1.2 del presente documento, el funcionamiento básico de un sistema RoF MMW consiste en transmitir y recibir señales radio-eléctricas, por medio de fibra óptica, basado en los principios de OFDM; en general puede tratarse de cualquier señal eléctrica, sin embargo, en el contexto de la presente investigación, la cual pretende simular un sistema FTTH-GPON *Quad Play*, es decir, el portafolio convencional de servicios *Triple Play* sumado al servicio de Internet móvil, es preciso caracterizar un sistema RoF apto para la prestación de servicios móviles. Ahora bien, considerando que los sistemas RoF surgieron a partir de la necesidad por parte del cliente de acceder a un servicio de Internet móvil a velocidades del orden de los multi-Gbps, los sistemas de cuarta generación móvil con su tecnología LTE la cual alcanza velocidades máximas de 1 Gbps, no serían una opción para la implementación real del sistema en cuestión, por lo tanto, es necesario encontrar otro estándar inalámbrico que cumpla con tales requerimientos.

El estándar que se propone corresponde al estipulado en el *Release 15* de la 3GPP, el cual define las consideraciones principales de los sistemas móviles de quinta generación, y abre una ruta para la futura y pronta implementación de los mismos. En particular, la tecnología inalámbrica creada a partir de este estándar, se denomina como *Nueva Interfaz Radio (NR, New Radio interface)* y presenta ventajas significativas, en cuanto a velocidades de transmisión (10 Gbps), ancho de banda, latencia, entre otros, con respecto a la tecnología LTE de los sistemas 4G [53]. Según lo anterior, para la correcta caracterización del módulo RoF, es necesario definir un sistema que module de forma óptica una determinada señal eléctrica que tenga las características básicas de una señal 5G, o bien, basada en la tecnología NR, por lo que resulta necesario definir sus características generales.

En el *Release 15* de la 3GPP, se establecen dos bandas de operación para la prestación de servicios móviles: la banda FR1 cuyo rango va desde 0.4 a 7.1 GHz y la banda FR2 cuyo rango va desde 24 GHz hasta los 52 GHz. Por lo cual, teniendo en cuenta que los sistemas RoF operan típicamente en la banda MMW, es necesario que el sistema RoF a implementar opere en la banda FR2. Por otro lado, es preciso señalar que los sistemas móviles actuales se conforman de varios canales físicos para la transmisión de información. Existen canales físicos particulares para el *downlink* y el *uplink*, y cada canal transmite y recibe una determinada información. En general, existen los canales compartidos de información, los canales de control, los canales broadcast, entre otros. Para el *downlink* los canales se denominan: Canal Físico de Multidifusión (PBCH, *Physical Broadcast Channel*), Canal Físico Descendente Compartido (PDSCH, *Physical Downlink Shared Channel*) y Canal Físico Descendente de Control (PDCCH, *Physical Downlink Control Channel*); mientras que para el *uplink* se denominan: Canal Físico de Acceso Aleatorio (PRACH, *Physical Broadcast Channel*), Canal Físico Ascendente Compartido (PUSCH, *Physical Uplink Shared Channel*) y

Canal Físico Ascendente de Control (PUCCH, *Physical Uplink Control Channel*). El *Release 15* brinda información acerca del tipo de modulación en banda base de cada canal físico del sistema móvil, donde se evidencia que el único canal de bajada que se modula a partir de diversos esquemas M-QAM (QPSK, 16-QAM, 64-QAM y 256-QAM) es el PDSCH [54].

Además de lo anterior, cabe resaltar que el tipo de onda de la señal *NR* corresponde a una señal de tipo CP-OFDM, donde el número de subportadoras y valor de prefijo cíclico varían según la numerología⁴ y el ancho de banda del sistema; el *Release 15* define la cantidad máxima de Bloques de Recursos Físicos⁵ (PBR, *Physical Block Resource*) que se deben utilizar en el sistema de comunicación móvil para garantizar una serie de anchos de banda comprendidos entre 5 y 400 MHz, según los diferentes valores de numerología. En realidad, una de las principales ventajas técnicas de los sistemas móviles 5G es la capacidad de soportar un máximo de 3300 subportadoras OFDM, es decir, 275 PBRs, para garantizar un ancho de banda de 400 MHz con la numerología indicada, sin embargo, debido a que una de las limitantes de la herramienta (Véase *Sección 2.1.2.2*) es la gran cantidad de recursos computacionales que se requieren para simular un sistema OFDM con una cantidad de subportadoras mayor a 128, se hace necesario hacer uso de la menor cantidad de subportadoras OFDM que sea posible, en particular, el estándar establece que para garantizar un ancho de banda de 10 MHz, según la numerología adecuada, se requiere un número máximo de 11 PBRs, es decir, 132 subportadoras de carga útil, además del uso de un prefijo cíclico que puede ser de tipo normal o de tipo extendido, que típicamente tienen valores de $\frac{1}{4}$ y $\frac{1}{2}$ respectivamente. Es importante aclarar que una de las cualidades de los sistemas 5G es la capacidad de brindar enormes anchos de banda al transmitir información mediante ondas MMW, de hecho, el estándar establece un ancho de banda mínimo de 50 MHz cuando el sistema opere en el rango de frecuencias FR2; pese a esto, para brindar 50 MHz de ancho de banda se requiere de un máximo de 65 PBRs, es decir, 780 subportadoras, lo que implicaría una enorme cantidad de recursos computacionales para llevar a cabo el proceso de simulación mediante la herramienta OptSim, razón por la cual se propone realizar las pruebas con 132 subportadoras útiles.

Para conocer un poco más a detalle las características básicas de los sistemas 5G que expone el *Release 15*, se realizó una recopilación de información documentada en el Anexo B de la monografía.

Ahora bien, debido a que el análisis que se pretende realizar en esta investigación, consiste en determinar cómo incide la técnica de modulación M-QAM en el enlace de bajada de un sistema *Quad Play*, y considerando que, según el *release*, el único canal de bajada que se modula a partir de diversos esquemas M-QAM rectangulares es el canal PDSCH, es necesario definir el modelo conceptual a partir de las características descritas anteriormente, es decir, un módulo RoF para la prestación de servicios móviles 5G que opere en la banda de frecuencia FR2 y que transmita información del canal PDSCH, operando con 132 subportadoras de carga útil, bajo los esquemas de modulación QPSK, 16-QAM, 64-QAM y

⁴Concepto empleado en los sistemas móviles 5G que representa diferentes opciones para la transmisión de datos, en relación a características como: Periodo del Slot, cantidad de Slots por Trama, espaciamento entre subportadoras, prefijo cíclico, entre otros.

⁵Un PBR corresponde a 12 subportadoras OFDM consecutivas.

256-QAM. Considerando lo anterior, a continuación se realiza el respectivo modelo conceptual. En la Figura 2.9 se ilustra un esquema general de una red RoF.

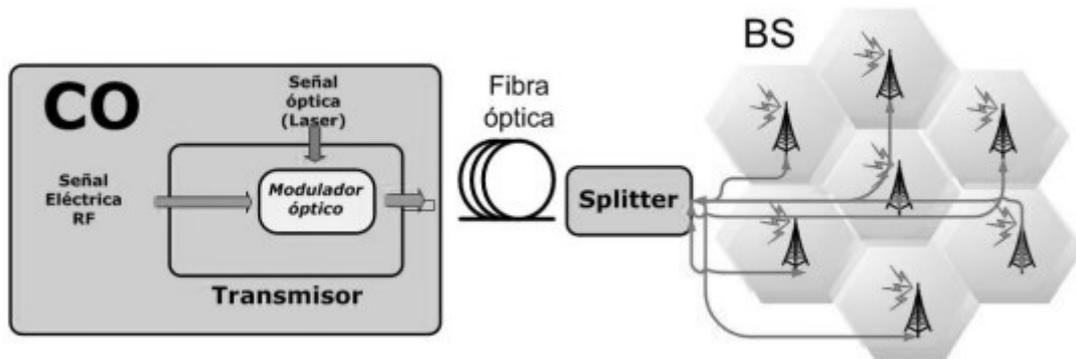


Figura 2.9. Diagrama general del sistema RoF [6].

A partir del diagrama anterior, y teniendo en cuenta que la presente investigación solo estudia el enlace óptico del sistema, mas no la transmisión inalámbrica que existe entre la estación base y el terminal móvil, en la Figura 2.10 se propone el modelo conceptual del módulo RoF que se pretende desarrollar. Cabe resaltar que los procesos eléctricos típicos realizados por el terminal móvil (Véase Figura 1.13.c) se realizarán a nivel de la estación base.

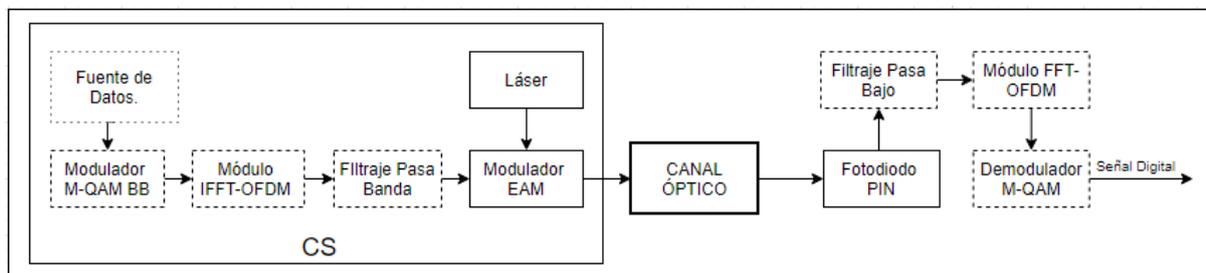


Figura 2.10. Modelo conceptual del sistema RoF.

A continuación, se describe cada uno de los módulos involucrados dentro del sistema RoF ilustrado en la Figura 2.10, cuyos parámetros y valores se establecen en concordancia con la investigación desarrollada en [11], y con base en las especificaciones técnicas definidas en el *Release 15* de los sistemas móviles 5G [53].

- **Proceso binario**

La fuente de datos o el generador de tráfico corresponden a una señal binaria de naturaleza aleatoria con una velocidad de transmisión de 10 Gbps.

- **Proceso eléctrico:**

Transmisor

- **Modulador multinivel:**
Tipo. M-QAM rectangular, es decir, QPSK, 16-QAM, 64-QAM y 256-QAM.
- **Módulo IFFT-OFDM:**
Número de subportadoras: 132.
Prefijo cíclico: Normal, valor: 0.25.

- **Mezclador (Módulo Quadrature-Mix):**
Frecuencia central: 28 GHz
Banda: n.257, según las bandas de operación de los sistemas 5G.
- **Combinador eléctrico.**
Atenuación: 3 dB.

Receptor

- **Splitter eléctrico:**
Atenuación: 3 dB.
- **Mezclador (Módulo Quadrature-Mix):**
Frecuencia central: 28 GHz
Banda: n.257.
- **Filtro pasa bajo:**
Tipo: Bessel.
- **Módulo FFT-OFDM.**
Número de subportadoras: 132
Prefijo cíclico: Normal, valor: 0.25.
- **Demodulador multinivel.**
Tipo: M-QAM rectangular.

- **Proceso óptico:**

Transmisor

- **Láser:**
Tipo: EML, Diodo láser modulado por electro-absorción (EML, *Electroabsorption Modulated Laser*). Lambda de operación: 1540 – 1555 nm.
- **Modulador externo:**
Tipo: EAM, Modulador de electro absorción (EAM, *Electroabsorption Modulator*), en concordancia con el estudio realizado en [11].

Canal Óptico

- **Fibra óptica:**
Tipo: *Corning Leaf*, en concordancia con el estudio realizado en [11].

Receptor

- **Splitter:**
Atenuación: 3 dB.
- **Filtro óptico:**
Tipo: Bessel, según el estudio realizado en [11].
Longitud de onda Central: 1540 - 1555 nm.
- **Fotodetector**
Tipo: PIN.
Longitud de Onda de Referencia: 1540 - 1555 nm.

2.2.3 MODELO CONCEPTUAL DE LA RED FTTH-GPON QUAD PLAY

Según lo expuesto anteriormente, los sistemas RoF transmiten una determinada señal RF por medio de fibra óptica hacia diferentes estaciones base, siendo un concepto muy similar al que plantea la tecnología FTTH, estudiada en la sección 1.1. Además, considerando que las redes PON hacen uso de la familia de tecnologías FTTx para la red de acceso final, y que existe una gran similitud entre las infraestructuras de red RoF y PON debido a que sólo implementan elementos pasivos entre transmisores y receptores, un sistema RoF se podría considerar como un sistema FTTH-PON.

Así mismo, teniendo en cuenta que el módulo RoF diseñado brinda servicios móviles 5G y opera en la banda de frecuencias FR2, la cual se encuentra en el rango de ondas MMW, los escenarios de implementación deben supeditarse a ambientes *indoor* debido a las limitaciones de cobertura que existen al transmitir en dicha banda, es decir, se trata de un sistema RoF basado en pico o femtoceldas, motivo por el cual se podría considerar como un sistema FTTH-PON *Indoor*.

Ahora bien, el concepto *Quad Play* se refiere a la prestación de cuatro portafolios de servicios por parte de una central hacia sus usuarios finales, mediante una única infraestructura de red y donde su despliegue es principalmente de carácter residencial. En el caso particular de esta investigación, los servicios *Quad Play* están compuestos por el portafolio *Triple Play* que brinda una red FTTH-GPON convencional y el servicio de Internet móvil 5G que soporta la red RoF diseñada, por lo tanto, para la correcta caracterización de la red *Quad Play* se debe realizar una integración de dichas redes.

Dentro de la red FTTH-GPON *Triple Play*, el estándar asociado a la transmisión es el estándar GPON, mientras que para los sistemas RoF no existe ningún estándar formal que indique una ruta de implementación de los mismos. Entonces, si se considera la recomendación ITU-T G.984.5 donde se definen nuevas bandas mejoradas de operación para la prestación de diferentes servicios como distribución de vídeo y servicios de *Acceso de Próxima Generación* (NGA, *Next Generation Access*), y además de eso, se considera que el sistema RoF diseñado se comporta de forma muy similar a una red FTTH-PON *indoor*, es posible integrar la red RoF diseñada a un sistema FTTH-GPON convencional.

Lo anterior se logra, primero que todo por la gran semejanza a nivel físico que existe entre sistemas FTTH-GPON y FTTH-PON *indoor*, donde se presentan grandes similitudes entre sus infraestructuras físicas de red, pero más que nada por la gran disposición que tiene el estándar GPON de soportar nuevas gamas de servicios de próxima generación, como se ilustra en la Figura 2.11, donde es evidente que si el servicio de Internet móvil se transmite en la banda mejorada para servicios NGA, es decir, entre valores de longitud de onda de 1530 y 1580 nm (exceptuando la ventana de 1550 nm del servicio de vídeo), la integración de las redes cumple con los requisitos estipulados en la recomendación.

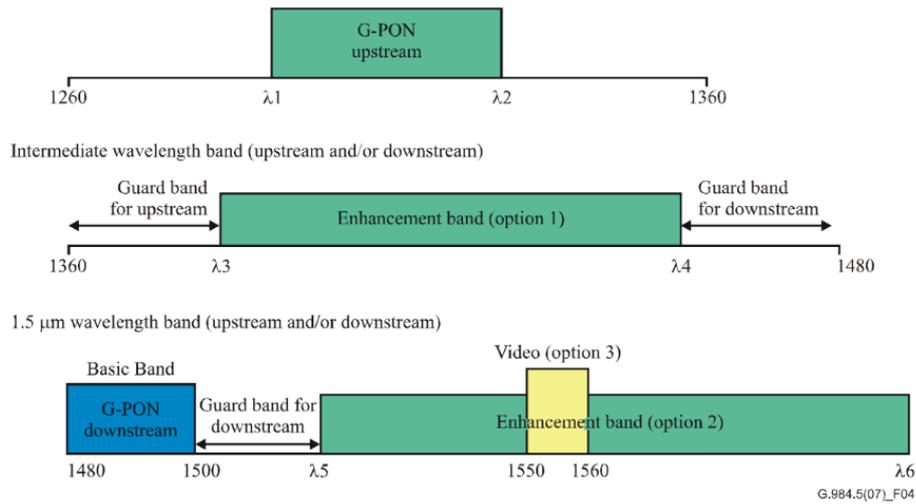


Figura 2.11 Bandas de operación en un sistema GPON. Tomado de [52].

El esquema general del sistema FTTH-GPON *Quad Play* se ilustra en la Figura 2.12. En el modelo se aprecia que la OLT se encuentra conformada por la OLT de la red FTTH-GPON *Triple Play* y la CS de la red RoF, así mismo, la ONT se conforma por la ONT de la red *Triple Play* y la BS propuesta para la red RoF. Por lo tanto, las características de la red FTTH-GPON *Quad Play* son las mismas que las definidas para cada uno de los sistemas que lo integran, aunque para el caso del tipo de fibra óptica utilizada, se sugiere hacer uso de la fibra *Corning-leaf* debido a que, según [11], los sistemas RoF tienen un comportamiento insuficiente cuando se hace uso de la fibra *SMF-28*.

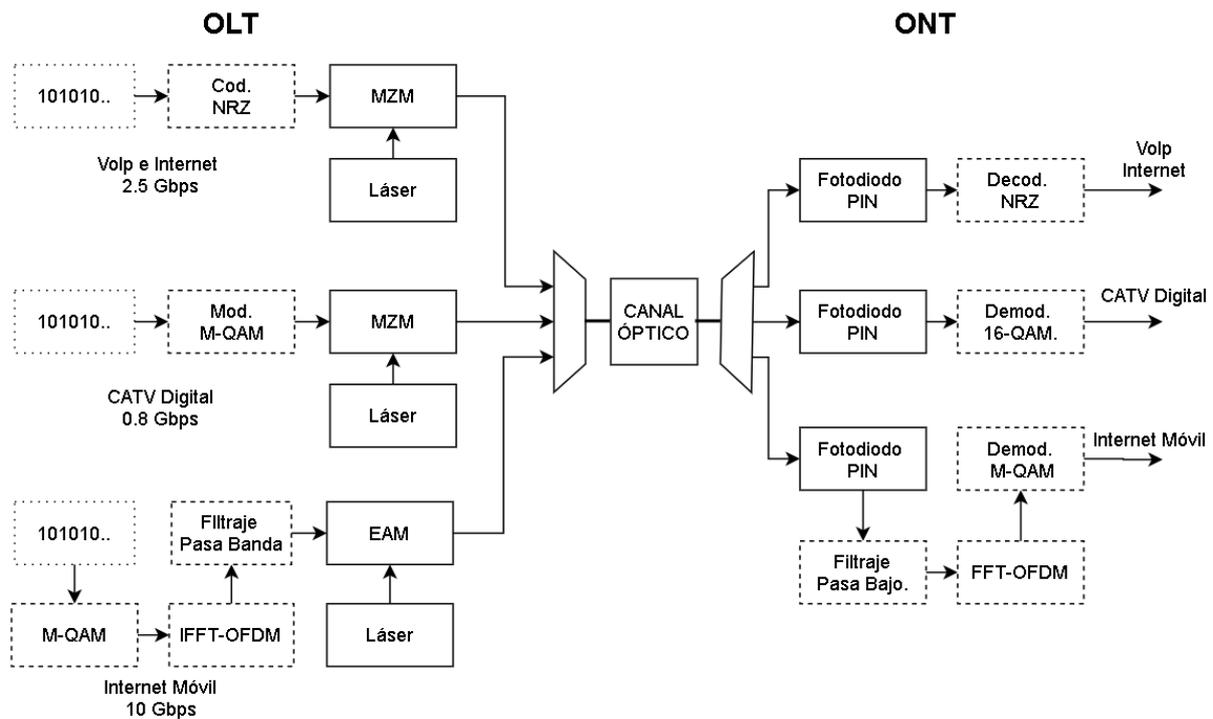


Figura 2.12. Modelo conceptual de la red FTTH-GPON *Quad Play*.

2.3 FASE DE DESARROLLO

En esta sección, se definen los modelos físicos de red, es decir, la caracterización de los modelos conceptuales descritos anteriormente, a través de la herramienta software OptSim.

2.3.1 MODELO FÍSICO DE LA RED FTTH-GPON *TRIPLE PLAY*

Con base en la red FTTH-GPON *Triple Play* caracterizada en [21], y del modelo conceptual de la red (Véase Figura 2.7 y Figura 2.8), es posible caracterizar la red a simular en el entorno OptSim, tal como se ilustra en la Figura 2.13.

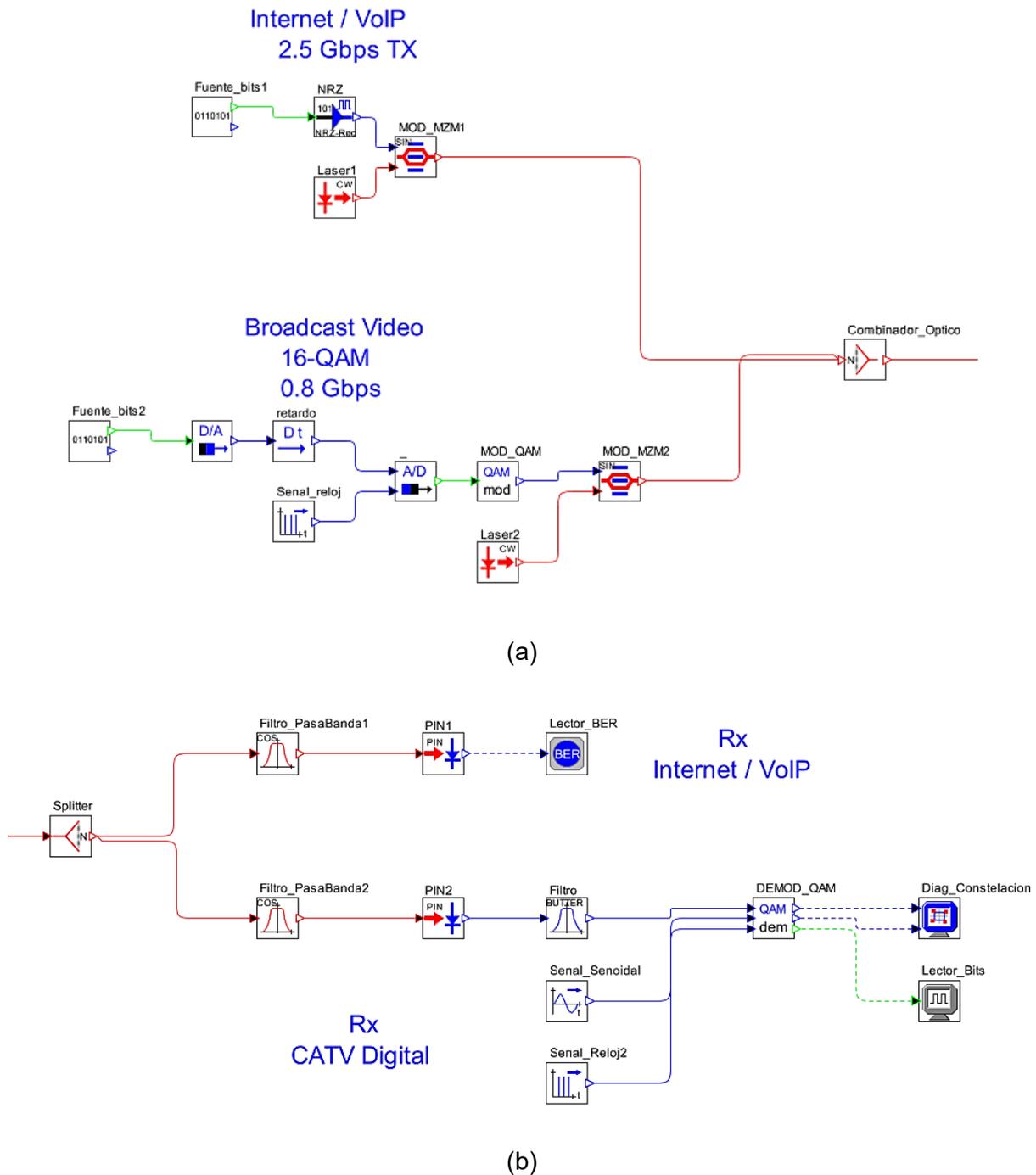


Figura 2.13. Modelo físico de la red FTTH-GPON *Triple Play* para 1 ONT. (a) OLT (b) ONT

El proceso de simulación de la red mostrada en la Figura 2.13, se realiza mediante la configuración de una serie de parámetros que se listan a continuación:

Tabla 2.1 Parámetros establecidos para la simulación de la red FTTH-GPON *Triple Play*.

Parámetro	Valor
SERVICIO DE DATOS	
Tasa de Transmisión	2.5 Gbps
Longitud de Onda	1490 nm
Potencia de Transmisión	0 dBm
Modulación Óptica	Externa. MZ.
Sensibilidad	-27 dBm
CATV DIGITAL	
Modulación Banda Base	16-QAM
Tasa de Transmisión	0.8 Gbps
Frecuencia Portadora	1000 MHz
Modulación Óptica	Externa. MZM.
Potencia de Transmisión	8 dBm
Longitud de onda	1550 nm
Sensibilidad	-16.3 dBm

Para el caso de un arreglo de varias ONTs, el modelo físico de red corresponde al mostrado en la Figura 2.14.

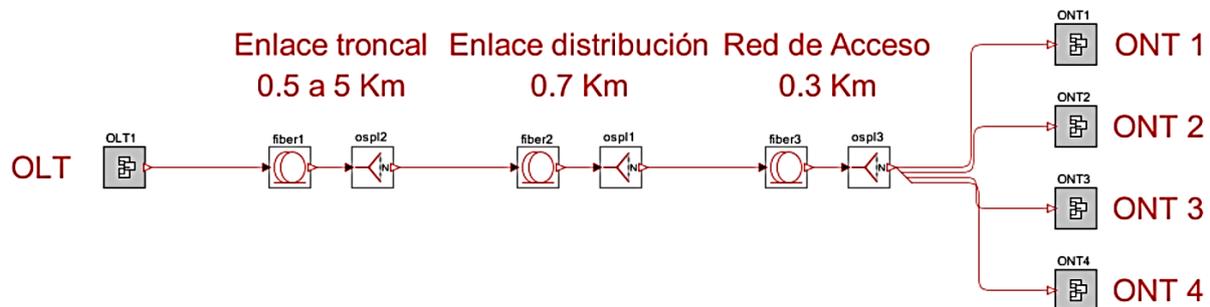


Figura 2.14. Modelo físico de la red FTTH-GPON *Triple Play* para 4 ONTs.

2.3.2 MODELO FÍSICO DE RED DEL MÓDULO RoF

En concordancia con el modelo conceptual del módulo RoF, se hace su respectiva representación en la herramienta de simulación, como se muestra a continuación:

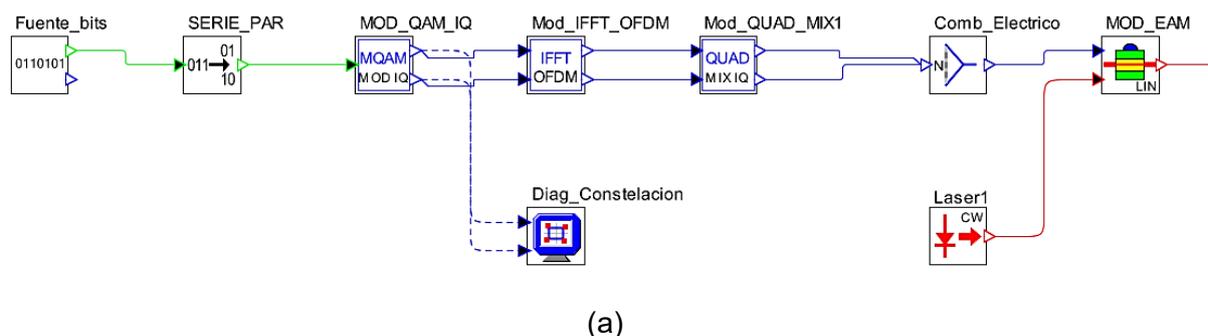
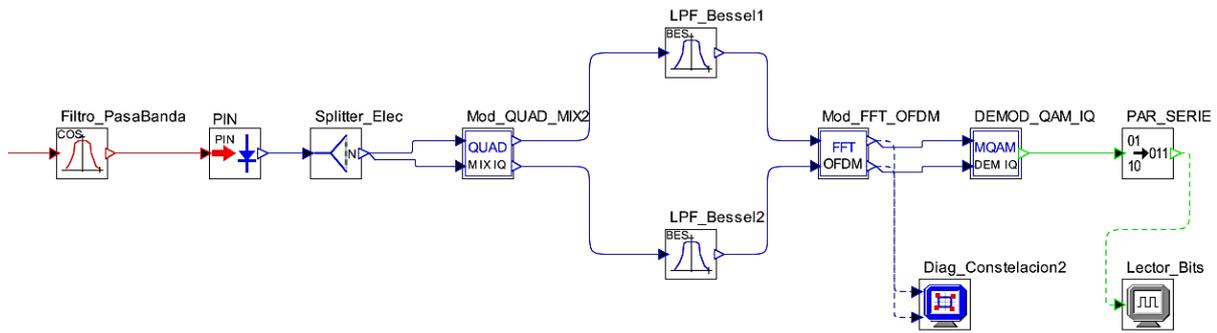


Figura 2.15. Modelo Físico de la red RoF. (a) Transmisor.



(b)

Continuación. Figura 2.15 Modelo físico de la red RoF. (b) Receptor.

Dentro de la red, los parámetros configurables se fijan con los valores que se indican a continuación:

Tabla 2.2. Parámetros establecidos para la simulación de la red RoF.

PARÁMETRO	VALOR
Tasa de bits	10 Gbps.
Número de subportadoras	132
Prefijo cíclico	0.25 / 0.5
Retardo	0 ps
Frecuencia portadora RF	28 GHz
Longitud de Onda del láser	1540 - 1555 nm
Potencia láser	0 dBm
Modulación BB	QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM.
Modulador óptico	Modulador de electro-absorción.

2.3.3 MODELO FÍSICO DE LA RED FTTH-GPON QUAD PLAY

La red FTTH-GPON que proporcione servicios de datos, vídeo e Internet móvil de forma conjunta hacia los usuarios finales es el resultado de integrar la red RoF con la red FTTH-GPON *Triple Play* convencional. En la Figura 2.16 se ilustra el esquema general, a nivel de simulación, de una red FTTH-GPON *Quad Play* para un usuario final (1 ONT). En la Figura 2.17, por su parte, es posible apreciar, a nivel de simulación, una red FTTH-GPON *Quad Play* para la prestación de servicios a cuatro usuarios finales (4 ONTs).



Figura 2.16. Modelo físico de la red FTTH-GPON *Quad Play* para 1 ONT.

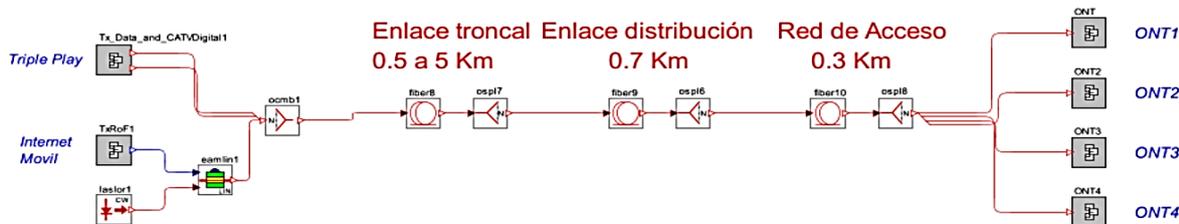


Figura 2.17 Modelo físico de la red FTTH-GPON *Quad Play* para 4 ONTs.

Dentro de los anteriores modelos de red, se configuran los parámetros de la siguiente manera:

Tabla 2.3 Parámetros establecidos para la simulación de la red FTTH-GPON *Quad Play*.

Parámetro	Valor
SERVICIO DE DATOS	
Tasa de Transmisión	2.5 Gbps
Longitud de Onda	1490 nm
Potencia de Transmisión	0 dBm
Modulación Óptica	Externa. MZ.
Sensibilidad	-27 dBm
CATV DIGITAL	
Modulación Banda Base	16-QAM
Tasa de Transmisión	0.8 Gbps
Frecuencia Portadora	1000 MHz
Modulación Óptica	Externa. Láser de onda continua.
Potencia de Transmisión	8 dBm
Longitud de onda	1550 nm
Sensibilidad	-16.3 dBm
SERVICIO DE INTERNET MÓVIL	
Tasa de bits	10 Gbps.
Número de subportadoras	132
Prefijo cíclico	0.25 / 0.5
Retardo	0 ps
Frecuencia portadora RF	28 GHz
Longitud de Onda del láser	1540 - 1555 nm
Potencia láser	0 dBm
Modulación BB	QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM.
Modulador óptico	Modulador de electro-absorción.

CAPÍTULO III: PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se desarrollan la *Fase de Pruebas* y la *Fase de Análisis* de la metodología planteada, es decir, se lleva a cabo el proceso de simulación y se hace una evaluación a cada escenario de prueba; en general, se realiza una recopilación de pruebas y de análisis en relación a las gráficas de la señal de información en las diferentes etapas del sistema y en relación a los resultados obtenidos respecto a los parámetros de evaluación del sistema.

3.1 SISTEMA FTTH-GPON TRIPLE PLAY

En este escenario de prueba, se simula la red FTTH-GPON *Triple Play* para arreglos de 1 y 8 usuarios, y distancias de 5 y 20 Km. Se recopilan los resultados obtenidos en relación a los parámetros de evaluación y a las gráficas de la señal de información en las diferentes etapas del sistema.

En la Figura 3.1(a) se muestra la red FTTH-GPON de 8 ONTs y en la Figura 3.1 (b) se ilustra el arreglo punto a punto.

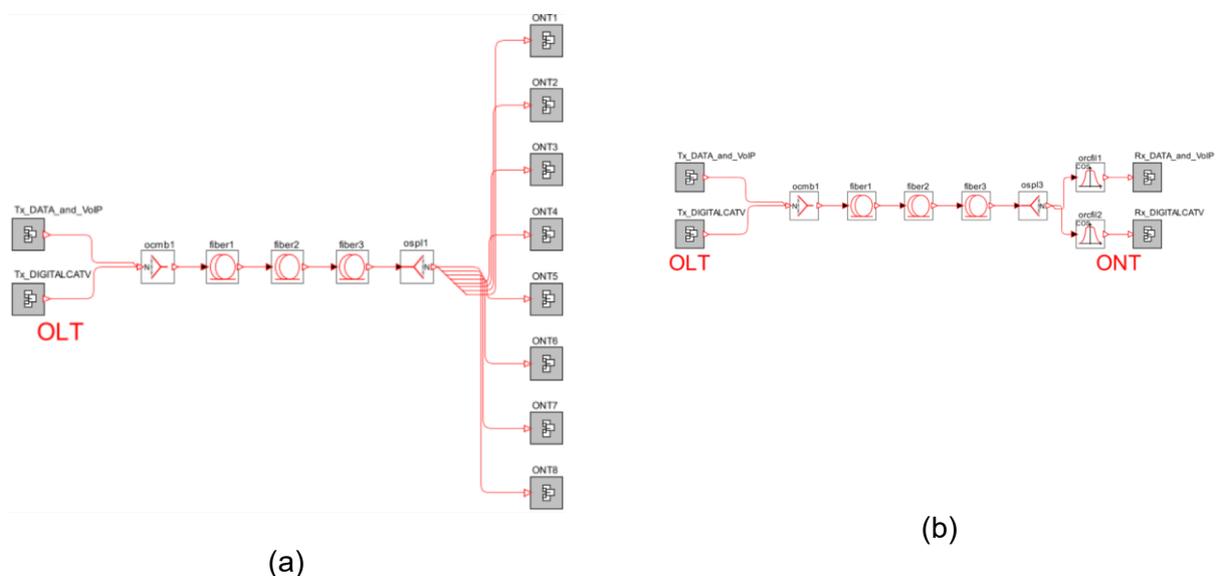


Figura 3.1. Red FTTH-GPON *Triple Play* diseñada (a) 8 ONTs (b) 1 ONT

3.1.1 ANÁLISIS DE LAS GRÁFICAS DE LA SEÑAL DE INFORMACIÓN EN DIFERENTES ETAPAS DEL SISTEMA

El transmisor de la red FTTH-GPON *Triple Play* se compone de dos elementos claves: El transmisor del servicio de datos y el transmisor del servicio de vídeo RF. A continuación, se describen los procesos involucrados en la generación de las señales para soportar tales servicios.

En la Figura 3.2 se muestra la señal de datos y VoIP que se desea transmitir a través del canal óptico, a una velocidad de 2.5Gbps; esta señal pasa por el módulo codificador de línea No Retorno a Cero (NRZ, *Non Return to Zero*) resultando la señal eléctrica que se aprecia en la Figura 3.3.

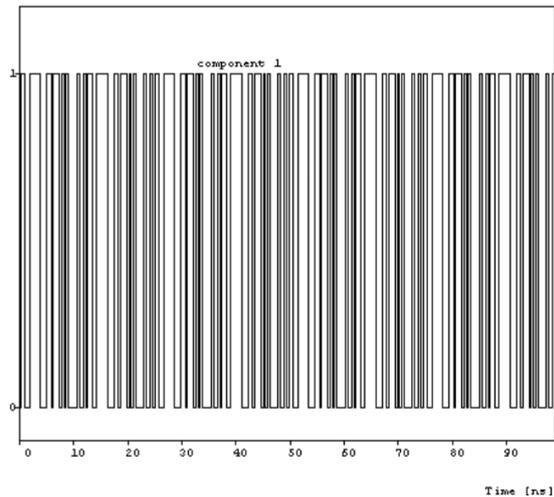


Figura 3.2 Señal de datos y VoIP generada

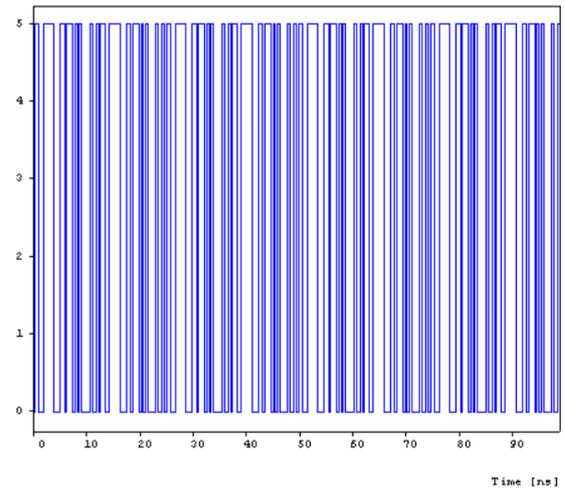


Figura 3.3 Señal de datos y VoIP después del NRZ

La señal en el dominio de la frecuencia después del módulo NRZ se presenta en la Figura 3.4; la cual ingresa al modulador MZM que la convierte al dominio óptico, como se ilustra en la Figura 3.5, usando un láser de onda continua a una frecuencia central de 201 THz (longitud de onda de 1490 nm).

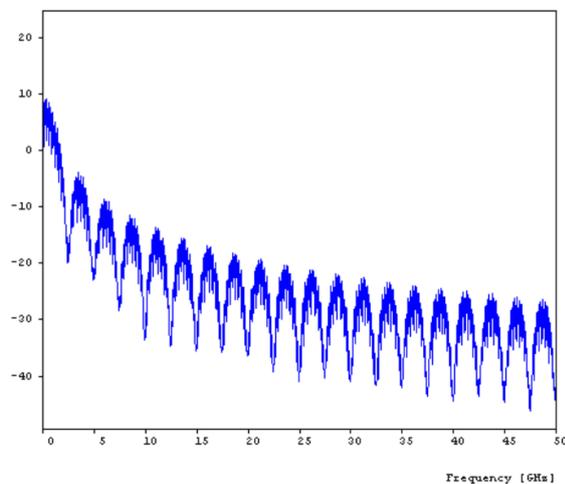


Figura 3.4 Señal de datos y VoIP después del NRZ en el dominio de la frecuencia.

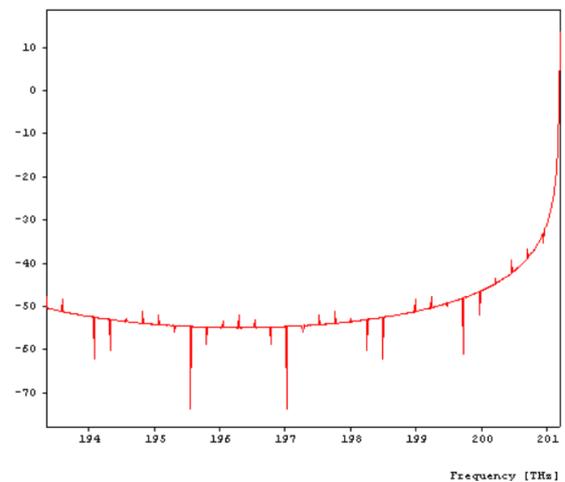


Figura 3.5 Espectro de la señal de datos y VoIP en el dominio óptico.

En cuanto a la transmisión de la señal de video *broadcast* (CATV Digital), cabe aclarar que se tuvo un procesamiento especial en comparación a redes convencionales, como lo sugiere [24], con el objetivo de alcanzar un mejor desempeño físico. La Figura 3.6 presenta la señal digital de video a una velocidad de 2.5 Gbps, la cual se compone de cuatro cadenas digitales de información en paralelo, que ingresarán al modulador 16-QAM para generar una señal eléctrica en el dominio del tiempo, cuyo espectro se indica en la Figura 3.7.

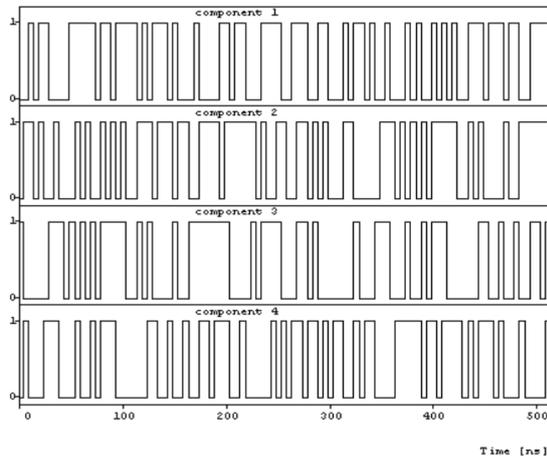


Figura 3.6. Señal digital de vídeo.

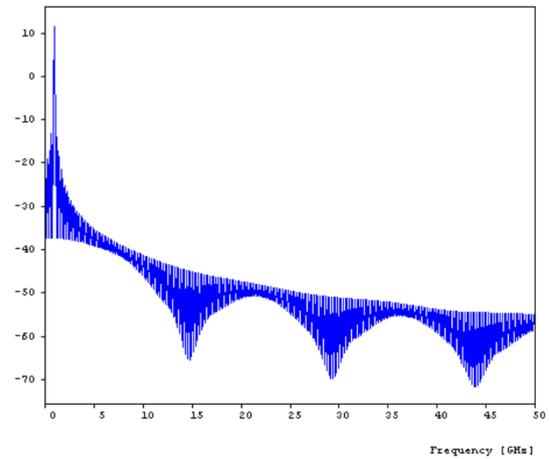


Figura 3.7. Espectro de la Señal QAM.

El diagrama de constelación asociado a la modulación 16 QAM se muestra en la Figura 3.8, donde es posible notar el posicionamiento de los 16 diferentes símbolos. Hasta este punto la señal de vídeo está en el dominio eléctrico y es necesario convertirla a una señal óptica, por lo cual ingresa al módulo MZM donde se genera una señal de salida con una portadora de 193.4 THz (longitud de onda de 1550 nm), cuyo espectro se ilustra en la Figura 3.9.

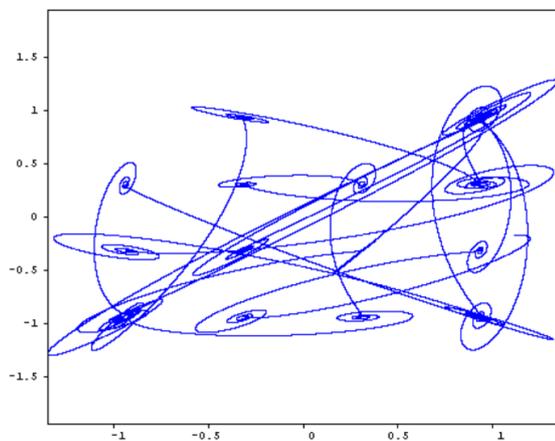


Figura 3.8. Diagrama de Constelación 16-QAM.

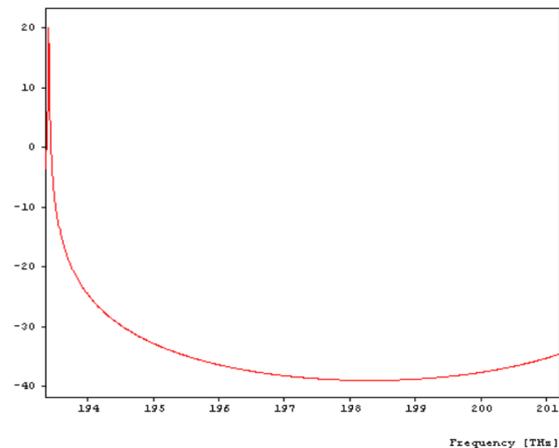


Figura 3.9 Espectro óptico de la señal de vídeo.

Posteriormente, la señal resultante se combina con la señal óptica de datos/VoIP para generar la nueva señal *Triple Play* cuyo espectro se puede apreciar en la Figura 3.10. Esta señal se transmite a través de un enlace de fibra óptica SMF-28 de 5 Km de longitud, dando como resultado la señal *Triple Play* recibida, con su espectro ilustrado en la Figura 3.11.

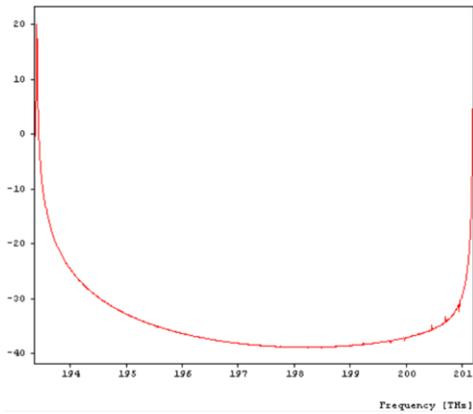


Figura 3.10 Espectro óptico de la señal *Triple Play* transmitida.

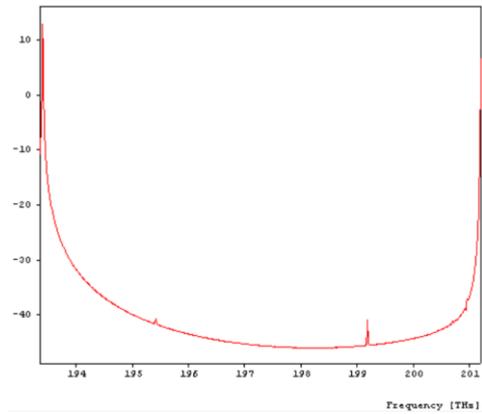


Figura 3.11. Espectro óptico de la señal *Triple Play* recibida.

La Figura 3.11 muestra la señal óptica en el dominio de la frecuencia luego de haber sido transmitida por un enlace de fibra óptica de 5 Km, donde se observa que se han adicionado señales no deseadas (ruido) aunque son muy débiles en cuestión de potencia en comparación con la señal *Triple Play*, y cómo se atenuó la señal aproximadamente 10 dB.

Dentro del receptor, se debe recuperar las señales de VoIP/datos y vídeo RF. La primera etapa consiste de un *Splitter* que divide la señal en dos réplicas idénticas las cuales se deben filtrar para recuperar la información asociada a cada servicio, en otras palabras, para el caso de VoIP se debe emplear un filtro pasa banda centrado en 201 THz y para el caso de vídeo RF se requiere de un filtro pasa banda centrado en 193.4 THz. Los espectros de las señales recibidas de VoIP/datos y vídeo se ilustran en la Figura 3.12 y 3.13, respectivamente.

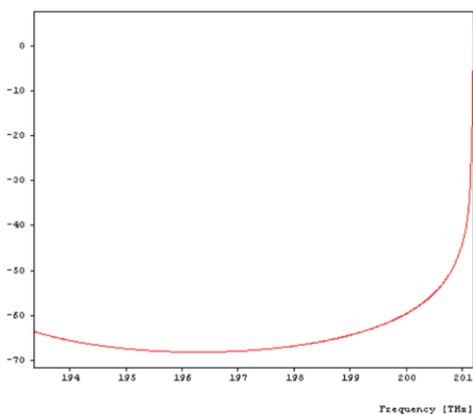


Figura 3.12. Espectro óptico de la señal de VoIP/datos recibida.

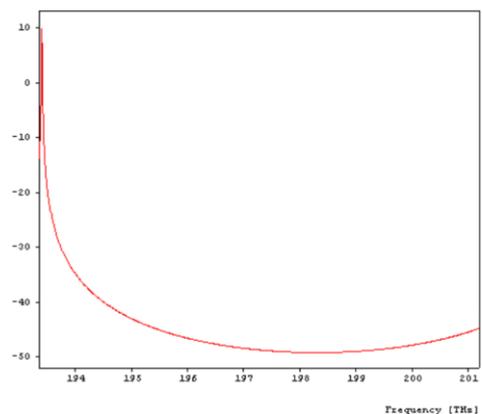


Figura 3.13. Espectro óptico de la señal de vídeo RF recibida

Cada señal recibida debe ser convertida al dominio eléctrico para poder realizar los procesos inversos del transmisor, por lo tanto, ingresan a fotodetectores tipo PIN. Para el caso de la señal de datos/VoIP, la señal eléctrica detectada, cuyo espectro y diagrama del ojo se ilustran en las Figura 3.14 y Figura 3.15, debe ser finalmente decodificada para obtener una réplica de la secuencia de bits original. Para el caso de la señal de vídeo, la señal eléctrica a la salida del fotodetector debe ser demodulada mediante el componente *ModQAM*, el cual interpreta los bits asociados a cada símbolo QAM de entrada, y del cual se obtuvo el diagrama de constelación ilustrado en la Figura 3.16, y el diagrama del ojo de la Figura 3.17.

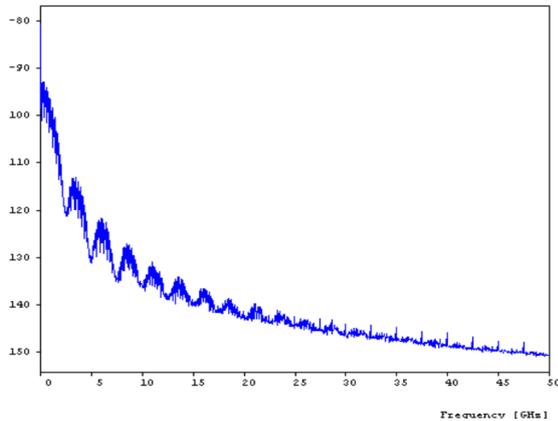


Figura 3.14 Espectro de la señal VoIP/datos recibida.

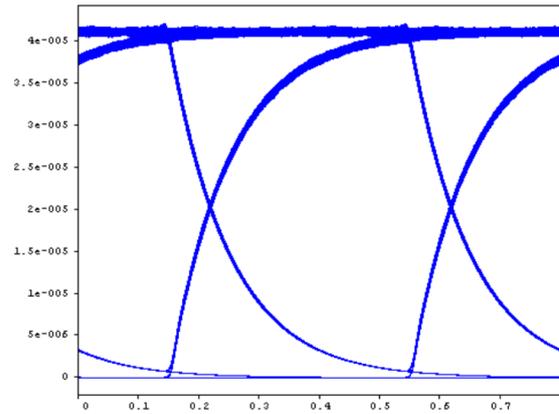


Figura 3.15. Diagrama del ojo asociado a la señal VoIP/datos recibida.

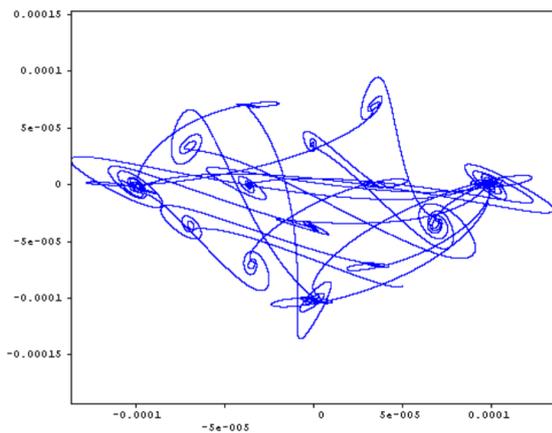


Figura 3.16 Diagrama de constelación en recepción, para la señal de vídeo RF recibida.

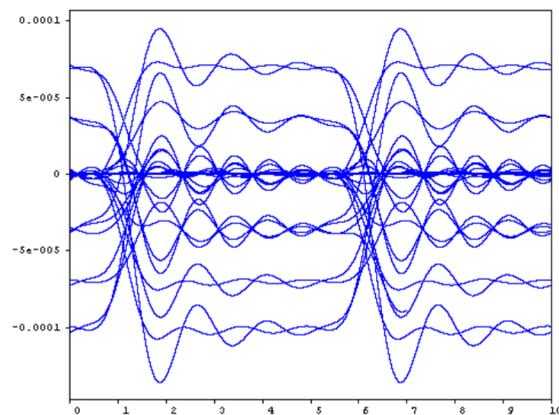


Figura 3.17 Diagrama del ojo asociado a la señal de vídeo RF recibida, en cuadratura.

En cuanto a la señal de VoIP/datos, se observa cómo el nivel de potencia del espectro recibido se ve atenuado aproximadamente 100 dB en relación al espectro de la señal original, así mismo, es evidente que a partir de aproximadamente 25 GHz, los lóbulos del espectro recibido empiezan a desvanecerse, mientras que para la señal original, el espectro se encuentra muy bien definido en la escala 0 GHz - 50 GHz. Sin embargo, a pesar de estos comportamientos, la señal es recuperada satisfactoriamente, según lo observado en el diagrama del ojo, el cual está perfectamente visible y además mantiene intacto el periodo de baudio, la amplitud del pulso y, sobre todo, no presenta traslape de símbolos. De esta manera, con una BER de 10^{-40} , un factor Q de 34.2dB y un Jitter de 0.06 ns se concluye que para una distancia de 5 Km en una topología árbol, el sistema presta un óptimo servicio de Datos y VoIP.

Ahora bien, en cuanto a la señal de video recibida, se presenta un desempeño menor que la señal de VoIP/Datos, para un enlace de 5 Km de fibra óptica, situación que se observa tanto en su diagrama de constelación asociado como en su diagrama del ojo medido; en el diagrama de constelación se ve claramente cómo la constelación tiene la misma distribución

de símbolos que el diagrama de constelación obtenido en transmisión (Véase Figura 3.8) pero se encuentra desfasado aproximadamente 45% de la posición original, a pesar de esto, si se estudia el diagrama del ojo en cuadratura medido, se ve cómo existe una clara distribución de los diferentes valores de voltaje asociados a los diferentes símbolos interpretados, lo que implica una correcta demodulación, y donde finalmente se obtuvo una BER igual a 3.5×10^{-10} , un factor Q de 16.03 dB, además de un Jitter muy cercano a 0 ns. No obstante, cabe resaltar que estos valores estimados no corresponden a la medida real del sistema, debido principalmente a la limitación que condiciona la herramienta, donde únicamente se pueden calcular los parámetros asociados al diagrama del ojo de forma exacta en sistemas que emplean modulación tipo binaria, sin embargo, cuando se configura la simulación a un número muy pequeño de muestras (que a su vez depende de los parámetros de simulación: *Bitrate* de referencia, ancho de banda de la simulación, y tramo del tiempo simulado) se puede aproximar la BER obtenida mediante el diagrama del ojo de la señal, ya sea en fase o en cuadratura, a la BER definitiva en el sistema, lo que permite concluir que el sistema *Triple Play* diseñado cumple con las exigencias mínimas para garantizar una adecuada transmisión de datos, para los requisitos de red estipulados.

3.1.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS RESPECTO A LOS PARÁMETROS DE EVALUACIÓN DEL SISTEMA

En este segmento, se hace un análisis de los resultados obtenidos en relación a los parámetros de evaluación del sistema. El contexto de la simulación consistió en el diseño de dos arreglos, uno para un usuario y el otro para 8 usuarios, y se varió la longitud del tramo de fibra troncal, tomando únicamente dos valores: 5 Km y 20 Km, el primero con fines comparativos en futuras secciones, y el segundo debido a que es la distancia típica de sistemas FTTH-GPON; los demás parámetros configurables se mantuvieron fijos. Las métricas de evaluación para una red FTTH-GPON *Triple Play*, considerando que se modula mediante un esquema binario (NRZ), son las siguientes:

- Tasa de error de bit.
- Factor Q.
- Potencia óptica recibida (Atenuación)
- Jitter

En la Tabla 3.1 se evidencian los resultados para 1 ONT, y en la Tablas 3.2 y 3.3 se evidencian los resultados para 8 ONTs.

Tabla 3.1. Resultados para 1 ONT, a 20 Km de distancia.

Servicio	Parámetro de Evaluación	Valor
VoIP Internet	Potencia Rx	-18.88 dBm
	BER	10^{-40}
	Factor Q	33,33 dB
	Jitter	0,06 ns

CATV Digital	Potencia Rx	-11,02 dBm
	BER	$5,86 \times 10^{-10}$
	Factor Q	16,02 dB
	Jitter	0 ns

Tabla 3.2. Resultados obtenidos para 8 ONTs, a 5 Km de distancia.

ONT	Servicio de VoIP e Internet				Servicio de CATV Digital			
	P_{RX}	Q	BER	Jitter	P_{RX}	Q	BER	Jitter
1	-18,88	32,85 dB	10^{-40}	0,063 ns	-14,016	15,95 dB	$5,7 \times 10^{-10}$	0 ns
2	-18,88	32,63 dB	10^{-40}	0,065 ns	-14,016	16,1 dB	$3,8 \times 10^{-10}$	0 ns
3	-18,88	32,59 dB	10^{-40}	0,064 ns	-14,016	15,96 dB	$4,4 \times 10^{-10}$	0 ns
4	-18,88	32,5 dB	10^{-40}	0,066 ns	-14,016	16,04 dB	$5,8 \times 10^{-10}$	0 ns
5	-18,88	32,67 dB	10^{-40}	0,065 ns	-14,016	16,04 dB	5×10^{-10}	0 ns
6	-18,88	32,86 dB	10^{-40}	0,067 ns	-14,016	15,95 dB	$5,7 \times 10^{-10}$	0 ns
7	-18,88	32,75 dB	10^{-40}	0,066 ns	-14,016	16,05 dB	$6,5 \times 10^{-10}$	0 ns
8	-18,88	32,71 dB	10^{-40}	0,065 ns	-14,016	16,12 dB	$3,9 \times 10^{-10}$	0 ns

Tabla 3.3. Resultados para 8 ONTs, a 20 Km de distancia.

ONT	Servicio de VoIP e Internet				Servicio de CATV Digital			
	P_{RX}	Q	BER	Jitter	P_{RX}	Q	BER	Jitter
1	-18,886	33,88 dB	10^{-40}	0,073 ns	-11,022	16,08 dB	$1,3 \times 10^{-10}$	1,30 ns
2	-18,886	33,76 dB	10^{-40}	0,071 ns	-11,022	16,04 dB	$1,1 \times 10^{-10}$	0,99 ns
3	-18,886	33,52 dB	10^{-40}	0,075 ns	-11,022	16,11 dB	$8,5 \times 10^{-11}$	0,98 ns
4	-18,886	33,97 dB	10^{-40}	0,073 ns	-11,022	16,08 dB	$6,7 \times 10^{-11}$	0,96 ns
5	-18,886	33,43 dB	10^{-40}	0,074 ns	-11,022	16,18 dB	$8,3 \times 10^{-11}$	1,12 ns
6	-18,886	33,32 dB	10^{-40}	0,075 ns	-11,022	16,01 dB	$9,8 \times 10^{-10}$	1.02 ns
7	-18,886	33,39 dB	10^{-40}	0,075 ns	-11,022	15,98 dB	$6,1 \times 10^{-10}$	0,95 ns
8	-18,886	33,81 dB	10^{-40}	0,074 ns	-11,022	15,88 dB	$4,3 \times 10^{-10}$	0,96 ns

Como se apreció en las gráficas de la señal ilustradas en el primer segmento de esta sección, para una distancia de 5 Km, el sistema tuvo un muy buen rendimiento en la transmisión de

servicios *Triple Play*. En relación a los servicios de VoIP y Datos, se estimó el valor óptimo de BER, es decir 10^{-40} , y un jitter muy bajo de 0.06 ns; mientras que para el servicio de CATV Digital se estimó una tasa de error de bit de aproximadamente 10^{-10} , siendo un valor muy adecuado para garantizar una transmisión de información confiable, y un Jitter de 1.2 ns. De esta forma, se evidencia cómo el impacto de las no linealidades de la fibra es casi intrascendente, debido a que los valores de Jitter estimados no presentan ningún efecto adverso en torno a la calidad de transmisión del sistema. Por otra parte, en cuanto al factor de calidad Q asociado al servicio de VoIP y Datos, éste se encuentra relacionado directamente con la BER debido al tipo de modulación banda base utilizada, que corresponde a un código de línea NRZ, y como el valor de la BER es óptimo, el valor del factor Q también es óptimo, siendo éste de 33 dB aproximadamente. Para el servicio de vídeo, debido a que la modulación obedece a un esquema multinivel, no hay una aproximación matemática exacta del parámetro, sin embargo, el diagrama del ojo (Véase Figura 3.17) permite un cálculo aproximado para este valor, el cual fue de 16.4 dB y corresponde con una medida bastante adecuada según lo estipulado en [21]. Así mismo, como se mencionó anteriormente, los diagramas del ojo tanto para los servicios de datos y vídeo, se muestran muy bien definidos por lo que se garantiza una transmisión de información en muy buenas condiciones.

Ahora bien, considerando los demás factores presentes en el contexto de este escenario de simulación, se puede ver que para el arreglo de un usuario, en el caso de VoIP y Datos, la BER se mantuvo en su valor ideal y el Jitter varió en una cantidad muy pequeña cuando se simuló con una distancia de 20 Km, caso similar al servicio de CATV Digital donde la BER fue de $5,86 \times 10^{-10}$, y el Jitter apenas se modificó. Para el arreglo de 8 ONTs se aprecia que, para una distancia de 5 Km, los valores estimados en cuanto a la BER y el Jitter para cada ONT son muy similares a los valores estimados para el arreglo de una sola ONT; misma situación ocurrida cuando la distancia del tramo de fibra troncal se alarga a 20 Km, los valores fueron muy semejantes a los estimados para un usuario.

En resumen, se evidencia que la red desplegada para servicios *Triple Play* es un sistema robusto de transmisión de información, y presenta muy buen desempeño para una distancia de 20 Km, pudiendo alcanzar muchos más kilómetros de cobertura. Resultados que son coherentes si se toma en cuenta los estudios realizados en [21, 50], en donde los autores realizan un análisis de la red al variar varios aspectos como: Potencia del láser, portafolio de servicios, longitudes de onda de acceso, cantidad de usuarios, entre otros, y manteniendo una distancia de prueba de 20 Km, obteniendo casi siempre buenos resultados en relación a la BER y el Jitter, incluso hasta para arreglos de 16 usuarios, 32 usuarios y 64 usuarios.

Por otra parte, la herramienta de simulación, en su modo muestra, presenta ejemplos de diferentes aplicaciones de sistemas de comunicaciones ópticos, en particular, expone un ejemplo de una red FTTH-BPON con topología en árbol, desplegada para la prestación de servicios *Triple Play*, cuya arquitectura es muy similar a la red simulada, pero presenta un bajo rendimiento en cuanto a la prestación del servicio CATV Digital para tramos de fibra muy extensos; en sí, su única diferencia con la red simulada es el sistema de transmisión asociado al servicio CATV Digital, donde el sistema en general es similar pero, en la red actual se hizo uso de componentes adicionales que generan un retardo intencionado a la señal digital para poder así garantizar un buen desempeño, en términos de BER y Jitter, para una distancia mínima 20 Km. El proceso descrito se hizo en concordancia con los resultados obtenidos en [21].

3.2 SISTEMA RoF DE INTERNET MÓVIL

En este escenario de prueba, se simula un módulo RoF al variar el esquema de modulación en banda base, la distancia del enlace de fibra, y la cantidad de usuarios finales, para el valor de longitud de onda de operación más adecuado; los demás parámetros configurables permanecen fijos.

Las métricas de evaluación para este sistema, considerando que se trata de una modulación multinivel, son las siguientes:

- Probabilidad de Error de Bit.
- Potencia recibida.
- Magnitud del vector de error.
- Diagrama de constelación.

En cuanto al parámetro EVM, el nivel mínimo para garantizar una correcta recuperación de los datos varía según el tipo de servicio ofrecido, estándar asociado o nivel del formato de modulación empleado; en especial, para los sistemas móviles 5G el *Release 15* propone una serie de valores mínimos requeridos de EVM, asociados a los diferentes canales físicos, siendo los valores umbrales del canal PDSCH aquellos que se listan a continuación:

Tabla 3.4. Umbrales mínimos requeridos de EVM para el canal PDSCH de los sistemas móviles 5G. Tomado de [54].

Formato de Modulación	QPSK	16-QAM	64-QAM	256-QAM
EVM [%] requerido	17.5 %	12.5 %	8 %	3.5 %

Por otra parte, en cuanto al parámetro BER es importante resaltar que debido a las limitaciones del software OptSim, descritas en la sección 2.1.2.2, cuando se trabaja con sistemas que empleen moduladores M-QAM no es posible tener una medida precisa de la tasa de error de bit a través de los elementos de monitoreo que posee la herramienta, ni de ningún otro factor asociado al diagrama del ojo (factor Q, jitter, apertura del ojo), sin embargo, debido a la importancia que tiene la medida de la BER en los sistemas de comunicaciones de datos, existen aproximaciones matemáticas que relacionan al parámetro EVM con el parámetro de relación señal a ruido SNR, y por ende a la probabilidad de error de bit asociada a la técnica de modulación M-QAM, aunque cabe anotar que la probabilidad de error de bit es un método sumamente teórico que se establece a partir del supuesto de que el canal de transmisión está modelado como un canal AWGN, mientras que la BER se estima de forma experimental, pero no dejan de ser conceptos que puedan aproximarse. De este modo, para el desarrollo del escenario de simulación, a pesar de los efectos no lineales y la función de transferencia cuántica que caracterizan a la fibra óptica, se asume un modelo de canal AWGN para poder encontrar un valor de BER asociado a cada nivel de EVM obtenido, con el fin de analizar el sistema desde otra perspectiva, donde los servicios de radiotelefonía móvil requieren un nivel máximo de BER de 10^{-3} para la correcta interpretación de los datos [11]. En el Anexo C se encuentra la información relacionada a la expresión matemática de la BER en términos de EVM, que a su vez también se encuentra en términos del nivel de modulación empleado.

En la Figura 3.18 se ilustra la red RoF caracterizada mediante la herramienta OptSim, la cual consiste de un arreglo configurado para 1, 2, 4 y 8 usuarios finales.

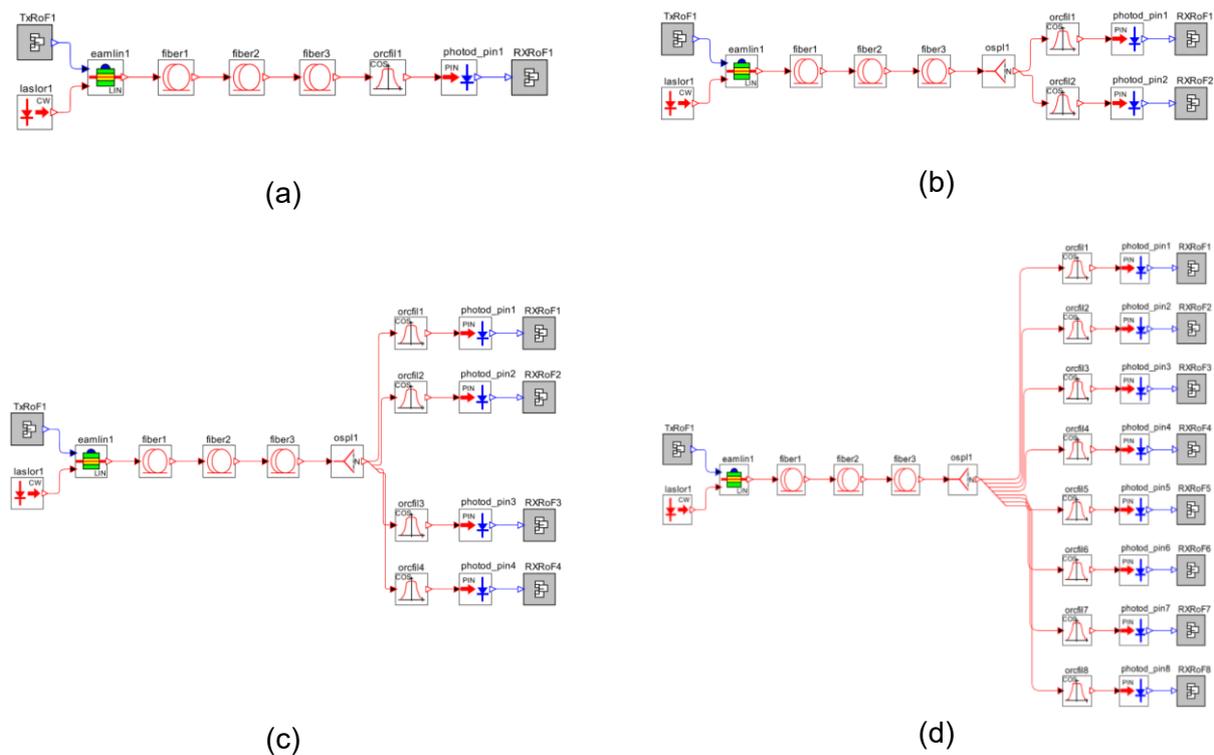


Figura 3.18. Red RoF diseñada (a) Punto a punto (b) Punto a multipunto, 2 usuarios (c) Punto a multipunto, 4 usuarios (d) Punto a multipunto, 8 usuarios.

Para poder llevar a cabo este escenario de prueba, el primer paso consiste en encontrar el valor de longitud de onda de operación que presente un mejor desempeño en términos de EVM, debido a que el sistema a simular está implementado bajo técnicas de modulación multinivel. En general, la herramienta OptSim, tal como se mencionó anteriormente, en la sección de ejemplos propuestos del modo muestra sugiere una red RoF basada en OFDM que opera con una longitud de onda de 1550 nm; no obstante, en este trabajo de investigación se realizarán pruebas para longitudes de onda de operación entre 1540 y 1555 nm, con el fin de encontrar el punto de mínima pérdida de información para la red RoF propuesta, en el rango establecido. Los parámetros de la red se establecen en concordancia con la Tabla 3.5, aunque el esquema de modulación se define en QPSK, y la distancia del enlace en 1 Km. Los resultados fueron obtenidos al simular mediante la técnica VBS y bajo la modalidad *Scan Run*, y se listan en la siguiente tabla:

Tabla 3.5. Resultados de EVM vs portadora óptica.

1540 nm	1541 nm	1542 nm	1543 nm	1544 nm	1545 nm	1546 nm	1547 nm
14.12%	13.96%	13.45%	13.59%	13.78%	13.67%	13.55%	13.49%
1548 nm	1549 nm	1550 nm	1551 nm	1552 nm	1553 nm	1554 nm	1555 nm
13.75%	13.99%	13.84%	13.68%	13.54%	13.43%	13.44%	13.79%

En la Tabla 3.5, se evidencia que los valores de EVM son muy similares entre sí, con un valor mínimo de 13.43% que se logra cuando se transmite en la ventana de los 1553 nm, y con un valor máximo de 14.12% cuando se transmite en la ventana de los 1540 nm. De igual forma, los diagramas de constelación arrojados en cada prueba arrojan gráficas muy similares entre ellas, garantizando una correcta recuperación de la información para todo el rango de longitudes de onda establecido; en la Figura 3.19 se ilustran los diagramas de constelación que se obtuvieron al transmitir en longitudes de onda de 1553 nm y 1540 nm.

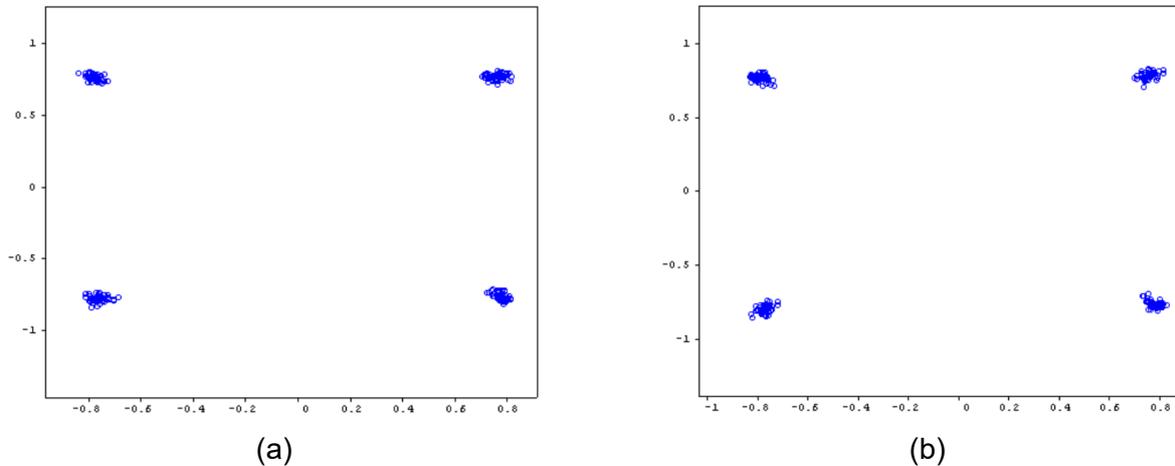


Figura 3.19. Diagrama de constelación en recepción. (a) 1553 nm (b) 1540 nm.

Luego de encontrar que el valor de longitud de onda más apropiado es 1553 nm, se lleva a cabo el proceso de simulación de las redes expuestas en la Figura 3.18, con la configuración que se define en la Tabla 2.2 y variando la distancia del enlace de fibra óptica; normalmente, las distancias típicas en redes cableadas de datos son mayores a 10 Km, sin embargo, a partir de los antecedentes investigativos más recientes [11] es preciso afirmar que a partir de esta distancia el sistema no presenta un buen rendimiento, por lo que resulta innecesario realizar pruebas con distancias mucho mayores, de modo que, se proponen valores de longitud a del enlace óptico entre 1 y 15 Km.

3.2.1 PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL SISTEMA RoF PARA UNA TOPOLOGÍA PUNTO A PUNTO

Para el sistema RoF con topología punto a punto (Véase Figura 3.18a), primero se plantea un análisis de resultados en relación al monitoreo de la señal de información en las diferentes etapas del sistema para una distancia fija de 5 Km, y posteriormente se analizan los resultados obtenidos al variar el parámetro de distancia. Lo anterior para los diferentes formatos de modulación M-QAM establecidos.

En el transmisor, la información digital es proporcionada a partir de la fuente binaria de datos, a una tasa de 10 Gbps, tal como se aprecia en la Figura 3.20

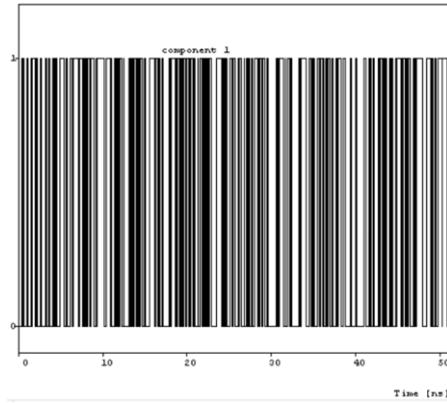


Figura 3.20. Señal digital de Internet móvil a 10 Gbps.

La señal digital de datos se divide en múltiples flujos paralelos de datos, simultáneos entre sí, mediante el componente lógico *SER-PAR*, con el fin de adecuarla a una configuración que pueda ser interpretada por el componente eléctrico *Modulador M-QAM*; la cantidad de flujos depende del esquema de modulación utilizado, por ejemplo, si se modula en QPSK, a la entrada del modulador se requieren 2 bits en un mismo instante de tiempo, mientras que para 16-QAM se requieren 4 bits, y así sucesivamente. En la Figura 3.21, se ilustra las diferentes señales de información, teniendo en cuenta el nivel de modulación.

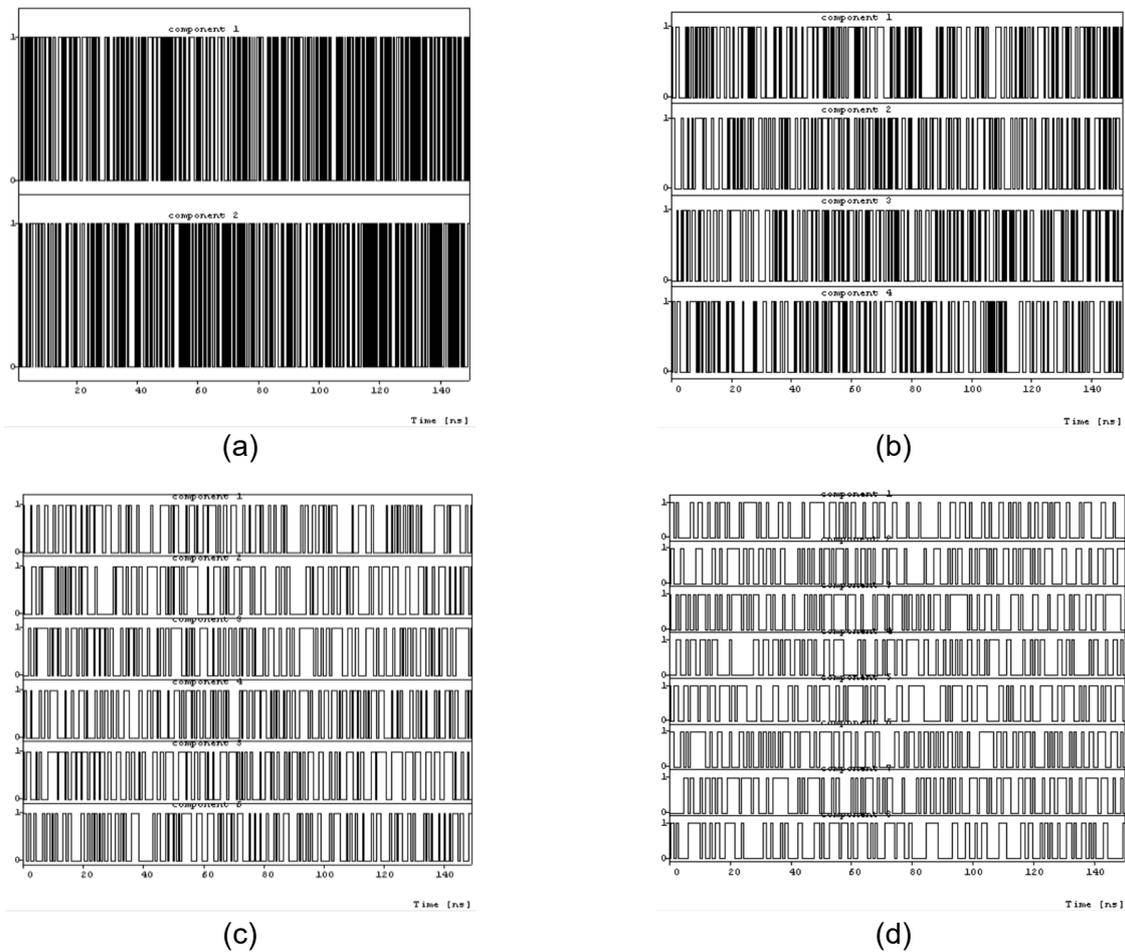


Figura 3.21. Señal digital de Internet móvil en paralelo. (a) QPSK (b) 16-QAM (c) 64-QAM (d) 256-QAM.

Los flujos paralelos de datos ingresan al componente *Modulador M-QAM* resultando dos señales eléctricas de información, la señal en fase y la señal en cuadratura; lo anterior resulta después de realizar un mapeo de bits bajo codificación *Gray*. En la Figura 3.22 se ilustra la señal QAM en cuadratura para cada esquema de modulación y en la Figura 3.23 su respectivo espectro.

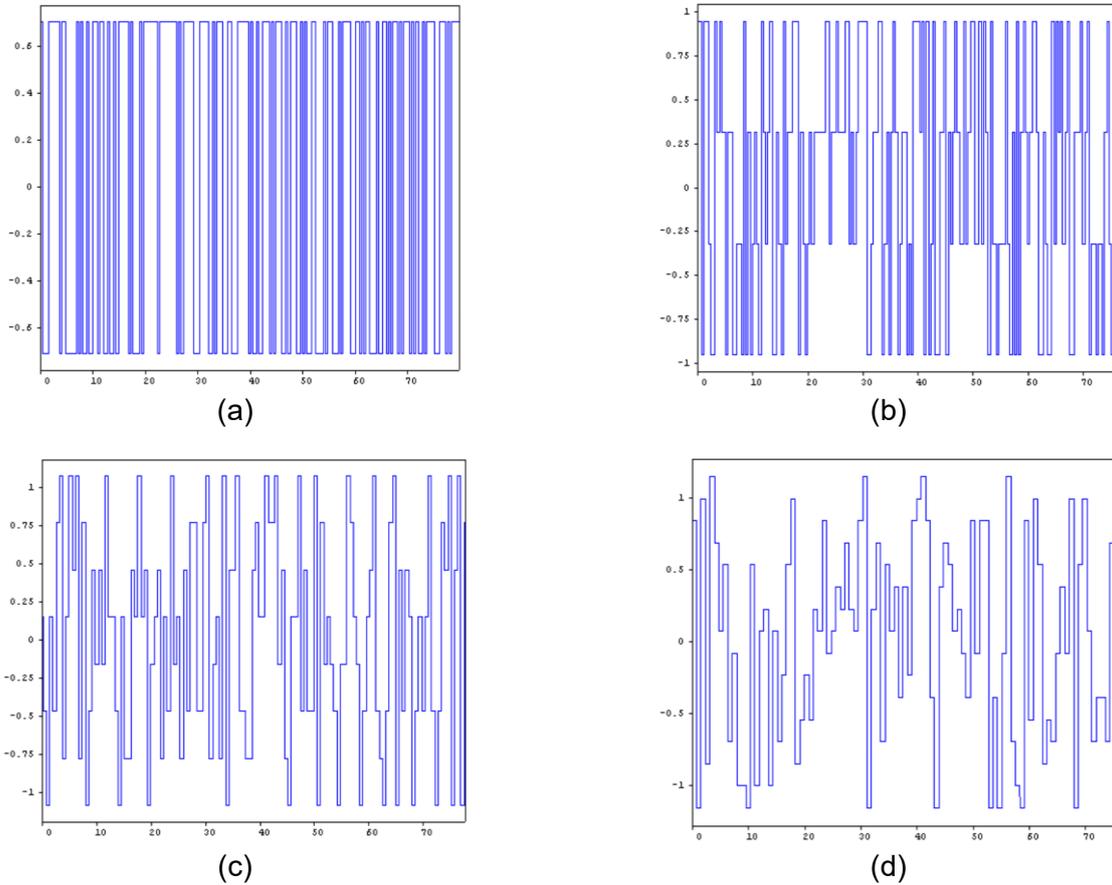


Figura 3.22. Señal eléctrica M-QAM, en cuadratura. (a) QPSK (b) 16-QAM (c) 64-QAM (d) 256-QAM.

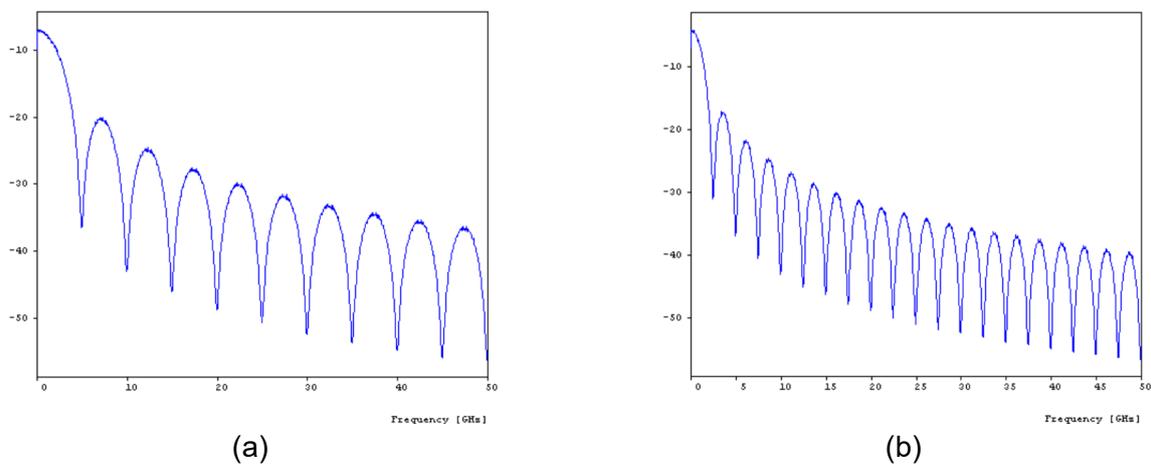
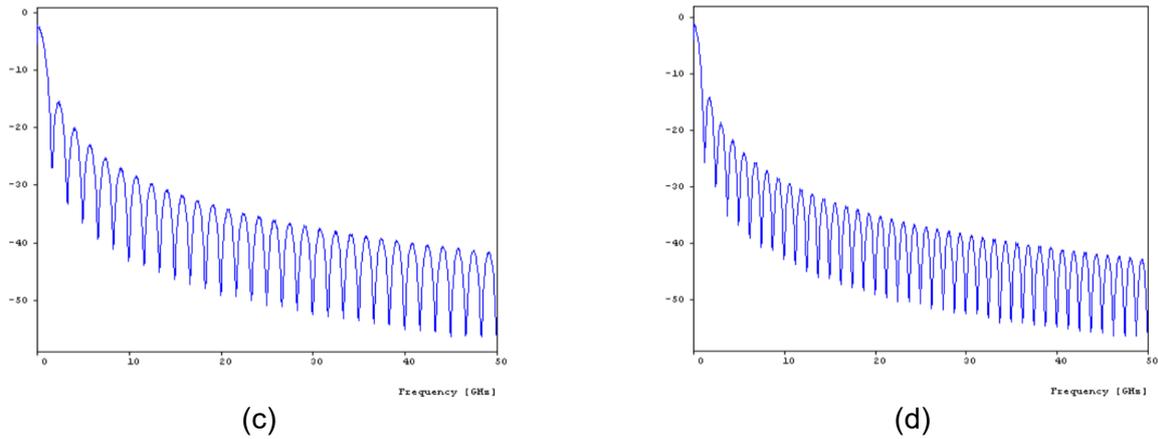


Figura 3.23. Espectro de la señal M-QAM, en cuadratura. (a). QPSK (b) 16-QAM.



Continuación. Figura 3.23. Espectro de la señal M-QAM, en cuadratura. (c) 64-QAM (d) 256-QAM.

Las señales eléctricas en fase y en cuadratura ingresan al componente *IFFT-OFDM*, que se encuentra configurado con 132 subportadoras útiles (Véase *Tabla 2.2*). Según [55], el componente representa el núcleo central de un transmisor OFDM, y su funcionamiento básico consiste en el cálculo de la transformada inversa rápida de Fourier sobre las entradas del módulo, es decir, las señales eléctricas M-QAM en fase y en cuadratura, dando como resultado dos señales OFDM en fase y en cuadratura; el proceso general realizado por el módulo *IFFT-OFDM* se evidencia en la Figura 3.24, y los espectros obtenidos durante la simulación se ilustran en la Figura 3.25, en relación a cada formato de modulación.

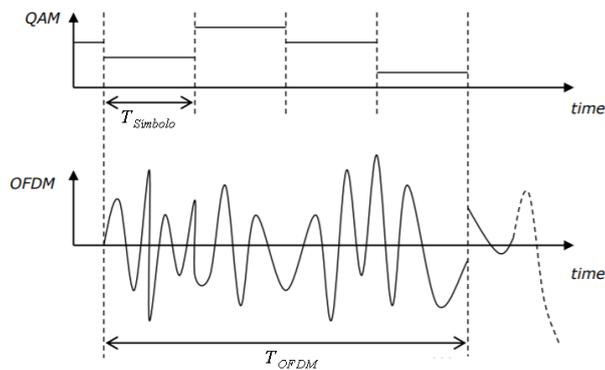


Figura 3.24. Proceso general del módulo *IFFT-OFDM* [55].

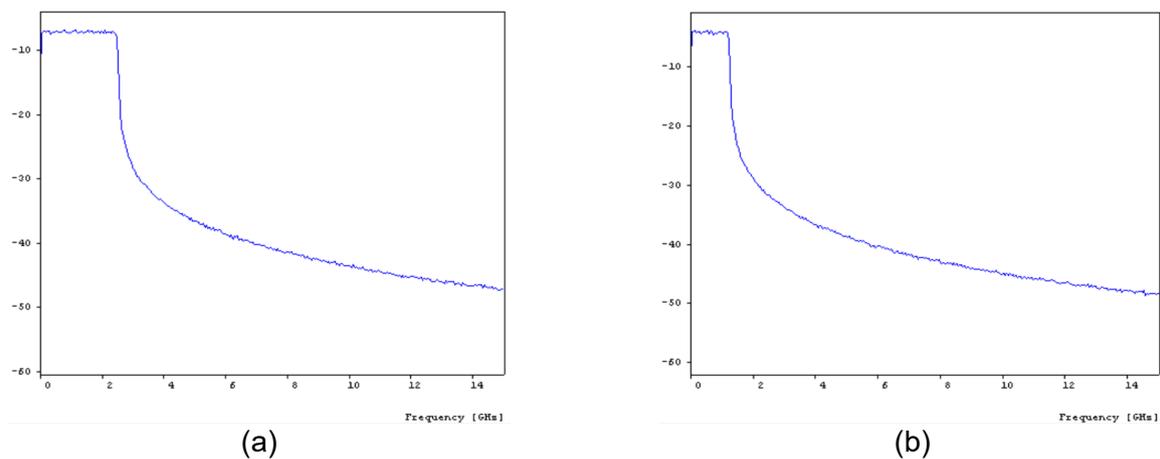
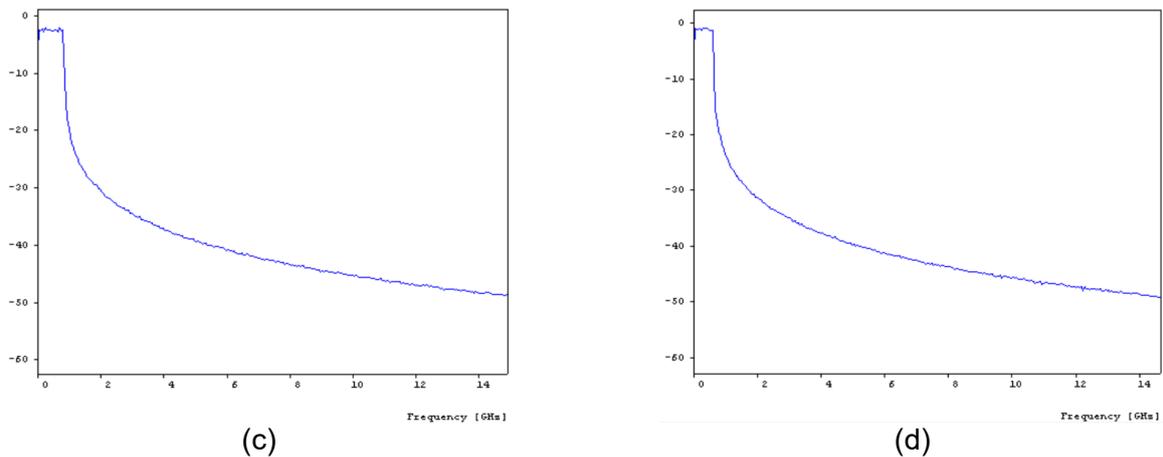


Figura 3.25. Espectro de la señal OFDM banda base, en cuadratura. (a) QPSK (b) 16-QAM.



Continuación. Figura 3.25. Espectro de la señal OFDM banda base, en cuadratura. (c) 64-QAM (d) 256-QAM.

En la Figura 3.25 se observa que los espectros de las señales OFDM asociados a cada esquema de modulación están centrados en el origen, es decir, se encuentran en banda base, y considerando que se debe transmitir sobre una portadora de 28 GHz, se requiere de un proceso de traslación en frecuencia de los espectros de las señales, en fase y cuadratura, que salen del módulo *IFFT-OFDM*; este procedimiento se logra mediante el bloque *Quadrature Mix*, que consiste de un componente *TITO* (*TITO, Two Inputs Two Outputs*) cuyas entradas son dos señales eléctricas banda base, en fase y en cuadratura, y mediante el proceso ilustrado en el diagrama de la Figura 3.26, proporciona como salida dos señales eléctricas pasa banda.

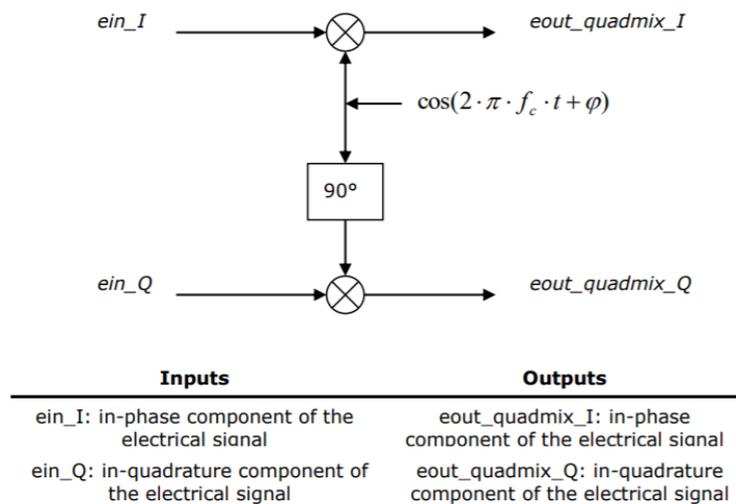


Figura 3.26 Proceso realizado por el componente *Quadrature Mix* [55].

Según el diagrama de bloques, las señales OFDM banda base, en fase y en cuadratura, ingresan al componente *Quadrature Mix* que arroja como salida dos señales con la misma información de la entrada pero sobre portadoras de 28 GHz desfasadas 90° entre sí, denominadas señales OFDM pasa banda; estas señales se combinan posteriormente mediante el *Combinador Eléctrico* con el fin de representar una única señal OFDM pasa banda, cuyo espectro se ilustra en la Figura 3.27 para cada esquema de modulación.

La señal OFDM pasa banda resultante debe ser sometida a un proceso de conversión eléctrico-óptico para poder transmitirse por medio de fibra óptica; este proceso consiste en modular un haz de luz de 194 THz, generado por el *Laser-Lorentzian*, mediante un modulador de electro-absorción, caracterizado por el componente *EAM*, el cual regula algunos parámetros asociados al haz de luz con base en los diferentes niveles de la entrada, que en este caso corresponde a la señal OFDM pasa banda. La salida del modulador equivale a la señal óptica RoF a transmitir y su espectro se muestra en la Figura 3.28; en este caso, solo se ilustra el espectro asociado a un esquema de modulación en particular (16-QAM) debido a la similitud entre los espectros obtenidos para los diferentes niveles de modulación.

La señal RoF ingresa a un componente denominado *Fiber-Link*, el cual modela la propagación de la señal a lo largo de un enlace de fibra óptica. Este componente es uno de los más complejos y fundamentales dentro de la librería que ofrece OptSim, ya que caracteriza un modelo de canal óptico que se rige a partir de una función de transferencia cuántica, y además considera todos los fenómenos lineales y no lineales que surgen de la propagación, como también los efectos relacionados a la polarización; en particular, la propagación del campo óptico se rige a partir de la ecuación no lineal de Schrödinger, y considera fenómenos como: PMD, birrefringencia⁶, efecto óptico Kerr, dispersión cromática, dispersiones estimuladas, atenuación, entre otros, siendo la mayoría de ellos configurables por el usuario, aunque también permite la escogencia de ciertas características típicas que poseen algunos tipos de fibra óptica comercial [55].

La salida del componente *Fiber-Link* equivale a la señal RoF recibida, es decir, después de propagarse por un enlace de fibra óptica *Corning-leaf* de 5 Km de distancia, y debido a la similitud entre los espectros asociados a cada esquema de modulación, en la Figura 3.29 se ilustra únicamente el espectro de la señal modulada en 16-QAM.

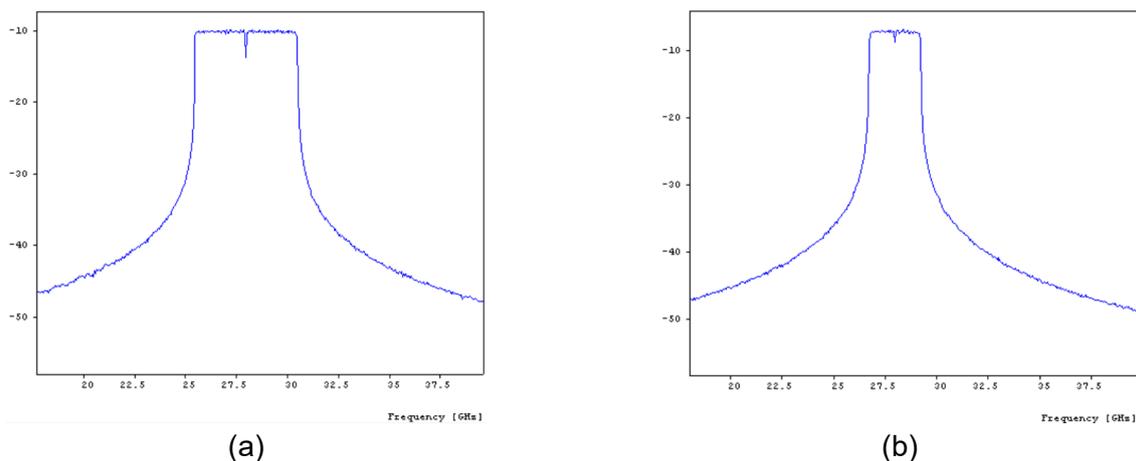
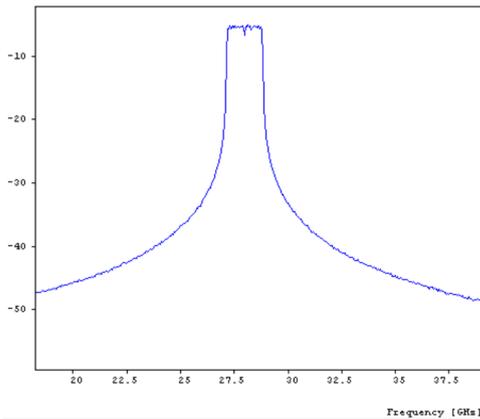
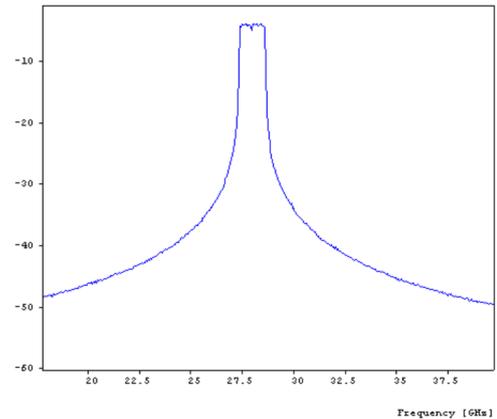


Figura 3.27. Espectro de la señal OFDM pasa banda. (a) QPSK (b) 16-QAM.

⁶Propiedad óptica intrínseca de aquellos materiales que poseen una estructura anisótropa, y produce un fenómeno de doble refracción de un haz de luz incidente, cuyos haces refractados son ortogonales entre sí y de polarización lineal, razón por la cual el material se comporta como si tuviera dos índices de refracción diferentes, donde uno de los haces refractados satisface las leyes típicas de refracción de *Snell*, mientras que el otro se comporta de forma variable.



(c)



(d)

Continuación. Figura 3.27 Espectro de la señal OFDM pasa banda. (c) 64-QAM (d) 256-QAM

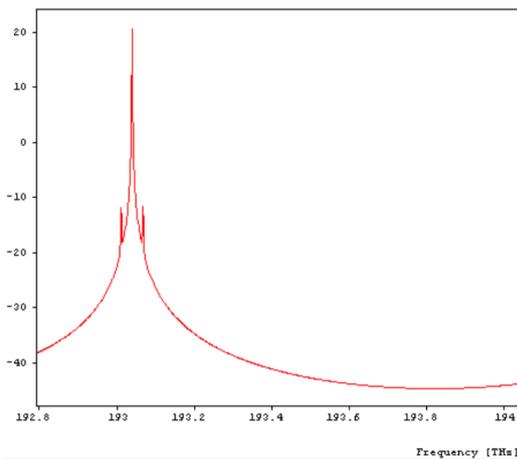


Figura 3.28 Espectro de la señal RoF antes del enlace de fibra, modulada en 16-QAM.

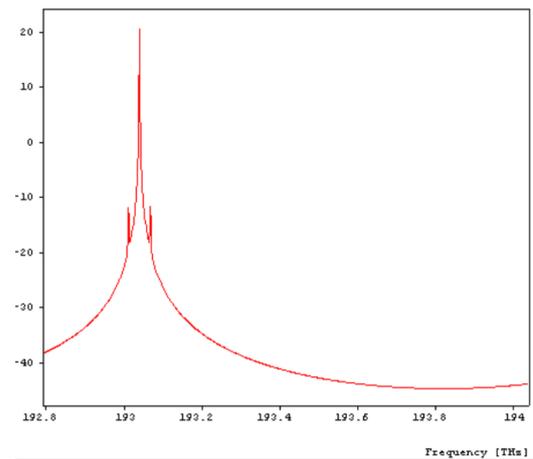


Figura 3.29. Espectro de la señal RoF después del enlace de fibra, modulada en 16-QAM.

En las Figura 3.28 y 3.29 se evidencia que, para las características de fibra óptica configuradas, no existe un gran impacto de los efectos lineales y no lineales que causa la propagación por este medio, al observar una gran similitud entre los espectros; además, se aprecia claramente que la señal RoF recibida no presenta ningún tipo de distorsión, ni mucho menos tiene lóbulos indeseados que puedan afectar la señal de información.

A manera de resumen, dentro del proceso de transmisión se evidencian tres etapas claves, la modulación banda base, la etapa pasa banda y la conversión electro-óptica; la modulación banda base está a cargo de los componentes *Modulador M-QAM* e *IFFT-OFDM*, la etapa pasa banda se efectúa mediante el componente *Quadrature Mix*, y la conversión electro-óptica se hace por medio del *Láser Lorentzian* y el modulador óptico *EAM*.

En el receptor, se debe interpretar la información digital que está contenida en la señal óptica RoF recibida, a partir de una serie de procesos inversos a los efectuados en el transmisor, es decir, una etapa de conversión opto-eléctrica, una etapa pasa banda inversa y una etapa de demodulación. A continuación, se describen dichos procedimientos:

En primer lugar, la etapa de conversión opto-eléctrica se realiza por medio del componente *PIN*, el cual modela un fotodiodo que se encarga de interpretar, a partir de una señal óptica de entrada, una determinada señal eléctrica de salida, que en este caso corresponde a la señal OFDM pasa banda recibida, cuyo espectro se ilustra en la Figura 3.30, para cada esquema de modulación. Cabe resaltar que este componente se debe configurar con un valor de longitud de onda de referencia igual al de la portadora óptica de entrada, siendo en este caso de 1553 nm.

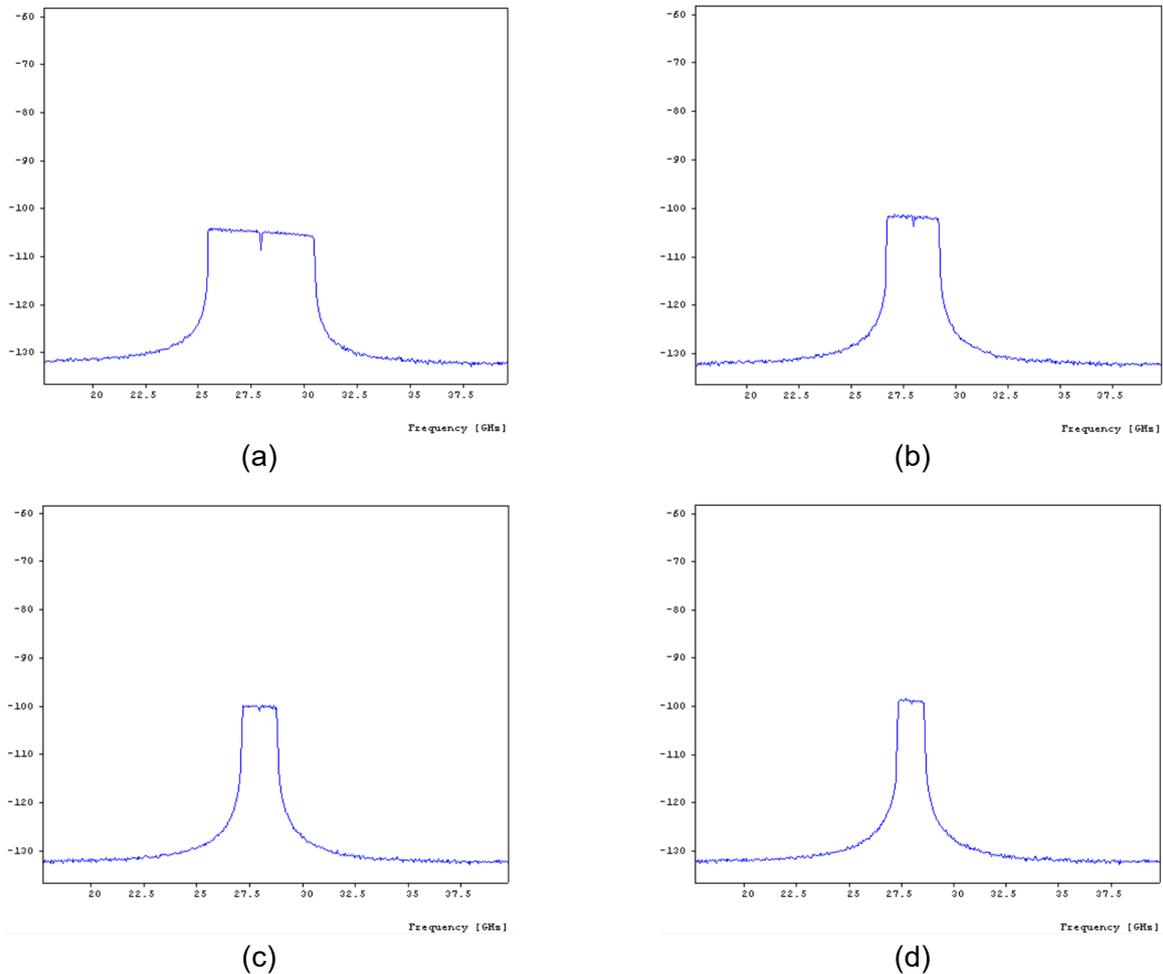


Figura 3.30. Espectro de la señal OFDM pasa banda recibida. (a) QPSK (b) 16-QAM (c) 64-QAM (d) 256-QAM.

Si se compara los espectros ilustrados en la gráfica anterior con los de la señal OFDM pasa banda transmitida (Véase Figura 3.27) es notorio ver una atenuación de aproximadamente 90 dB en los espectros obtenidos en recepción, siendo para todos los formatos de modulación prácticamente la misma; así mismo, es posible observar que dentro de las señales pasa banda recibidas, los espectros mantuvieron una forma bien definida en comparación a los originales, lo que garantiza que, si se aplican los procesos correctos, es posible una correcta recuperación de la información.

Por otra parte, es importante mencionar que las gráficas analizadas anteriormente se encuentran en una escala de frecuencias comprendidas entre 17.5 GHz y 40 GHz, motivo por el cual no se evidenció dos fenómenos asociados al comportamiento del fotodiodo *PIN*; el primero de ellos se trata de la presencia de un pico, de magnitud muy considerable, centrado

en el origen de frecuencias y que siempre se presenta de la misma manera, independientemente del formato de modulación utilizado, mientras que el segundo corresponde a un pequeño lóbulo originado en 56 GHz. En la Figura 3.31 se ilustra el espectro de la señal OFDM pasa banda transmitida y en la Figura 3.32 el espectro de la señal OFDM pasa banda recibida, donde se evidencian los fenómenos descritos; lo anterior, empleando un esquema de modulación QPSK y en una escala de 0 GHz a 70 GHz.

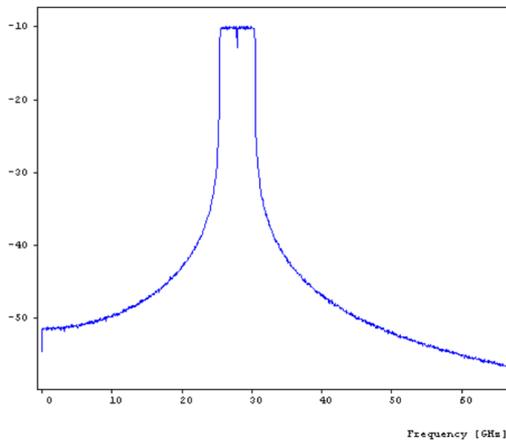


Figura 3.31 Espectro de la señal OFDM pasa banda transmitida, en QPSK.

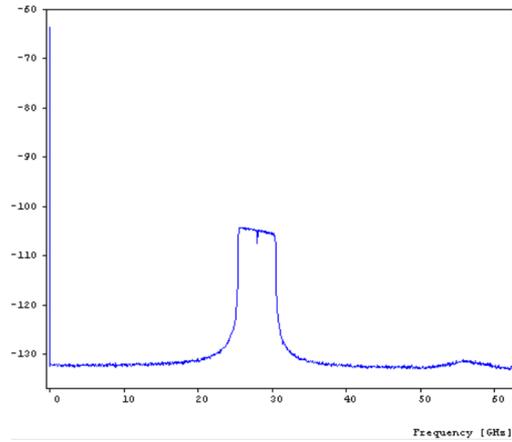


Figura 3.32 Espectro de la señal OFDM pasa banda recibida, modulada en QPSK.

Después de la etapa de conversión opto-eléctrica viene la etapa pasa banda inversa, donde la señal de alta frecuencia debe ser convertida a una señal banda base. Esto se logra, según lo estudiado en la sección 1.3.1.3 *DEMODULACIÓN EN UN SISTEMA M-QAM*, mediante los siguientes procesos:

En primer lugar, el componente *Splitter Eléctrico* divide la señal de alta frecuencia en dos señales idénticas, esto con el fin de poder recuperar posteriormente la información contenida tanto en fase como en cuadratura. Luego, las dos señales OFDM pasa banda resultantes ingresan al componente *Quadrature Mix*. Este módulo tiene como única función multiplicar las entradas por dos factores senoidales de igual frecuencia y desfasados 90° entre sí (Véase Figura 3.26), dando como resultado una traslación en frecuencia de los espectros de las señales de entrada, aunque para el caso de entradas de alta frecuencia cuyo valor de portadora corresponda al valor configurado dentro del componente, el resultado es una señal compuesta por la señal banda base y su respectivo armónico centrado en el doble de la portadora; para este caso en particular, como se evidenció en a Figura 3.32 el espectro de la señal OFDM pasa banda recibida, además de tener una componente centrada en 28 GHz presenta un pico de amplitud considerable en 0 GHz y un pequeño lóbulo centrado en 56 GHz, por lo cual, cuando las salidas del *Splitter Eléctrico* ingresan al componente *Quadrature Mix*, éste proporciona como salidas dos señales que representan la fase y la cuadratura, cada una con espectros compuestos por: El espectro banda base de su respectiva entrada, su armónico centrado en 56 GHz, el pico de gran amplitud pero ahora centrado en 28 GHz, y el pequeño lóbulo trasladado a una frecuencia de 84 GHz (Véase Figura 3.33).

Ahora bien, en este punto sólo son de interés las señales banda base en fase y en cuadratura, por lo tanto, se hace necesario aplicar un filtro pasa bajo a cada señal resultante, para eliminar los componentes no deseados y dejar únicamente el espectro banda base; esto se logra mediante el componente *FI-BES* el cual simula un filtro eléctrico tipo *Bessel*. El

comportamiento de los procesos anteriormente descritos se evidencia en la Figura 3.33 y Figura 3.34, cuando se transmite una señal modulada en 64 QAM.

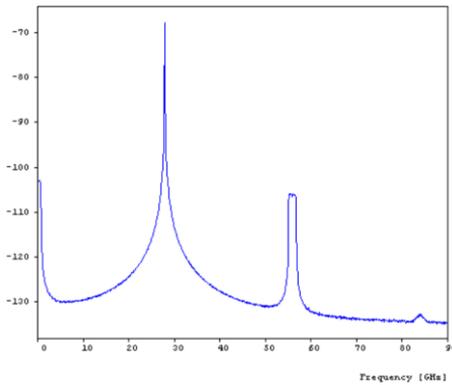


Figura 3.33. Espectro de la señal en cuadratura a la salida del componente *Quadrature Mix*, modulada en 64-QAM

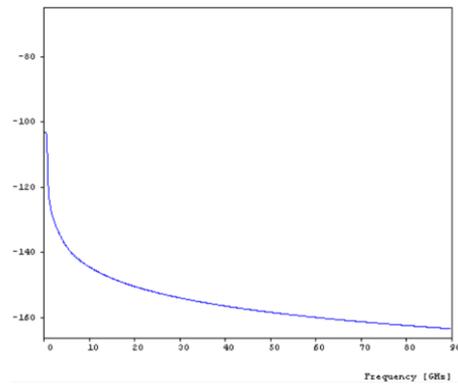
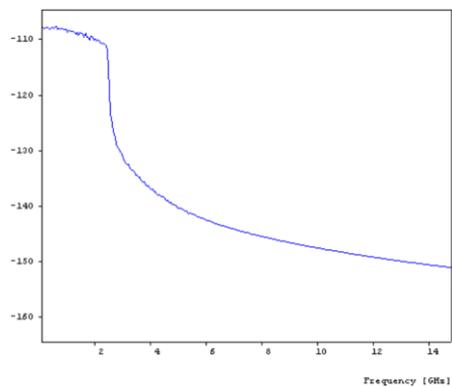
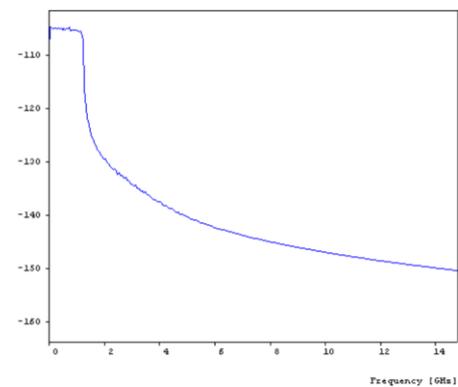


Figura 3.34 Espectro de la señal en cuadratura a la salida del filtro pasa bajo, modulada en 64-QAM.

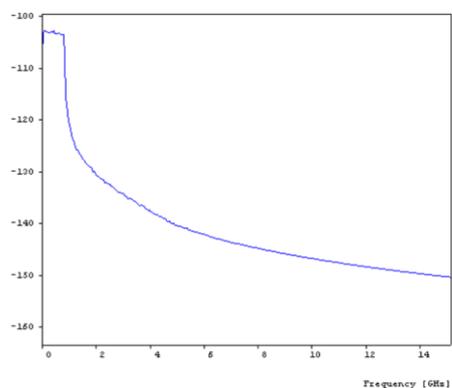
Así mismo, en la Figura 3.35 se ilustra el espectro de la señal OFDM banda base recibida, para cada esquema de modulación.



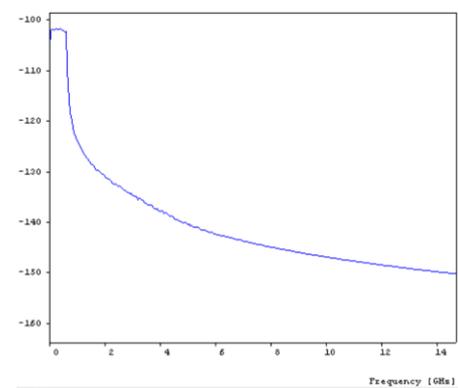
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3.35 Espectro de la señal OFDM banda base recibida, en cuadratura. (a) QPSK (b) 16-QAM (c) 64-QAM (d) 256-QAM.

En la ilustración anterior, se evidencia un comportamiento similar a los espectros pasa banda recibidos, donde existe una atenuación de aproximadamente 90 dB para todos los formatos de modulación y donde su forma se mantiene muy definida, en comparación a los espectros

obtenidos en transmisión (Véase Figura 3.25), lo cual indica que se implementaron procesos adecuados en la conversión opto-eléctrica y la etapa pasa banda inversa.

Las señales OFDM banda base en fase y en cuadratura recibidas, deben pasar por la etapa de demodulación para así obtener una réplica de la secuencia de bits original. Es importante recordar que la modulación banda base en el transmisor se llevó a cabo a través de los componentes *MOD-QAM* e *IFFT-OFDM*, por lo tanto, en el receptor se requieren de los procesos inversos, es decir, los componentes *FFT-OFDM* y *DEMODO-QAM*. El bloque *FFT-OFDM* es el componente núcleo de un receptor OFDM y debe estar configurado con los mismos parámetros que el componente *IFFT-OFDM* del transmisor; aquí se procesan las señales OFDM banda base de entrada, y a partir del cálculo de la *FFT* de las mismas se genera como salidas los símbolos M-QAM en fase y en cuadratura, cuyos espectros en cuadratura se ilustran en la Figura 3.36, y cuya distribución en el plano complejo, es decir, el diagrama de constelación asociado, se ilustra en la Figura 3.37.

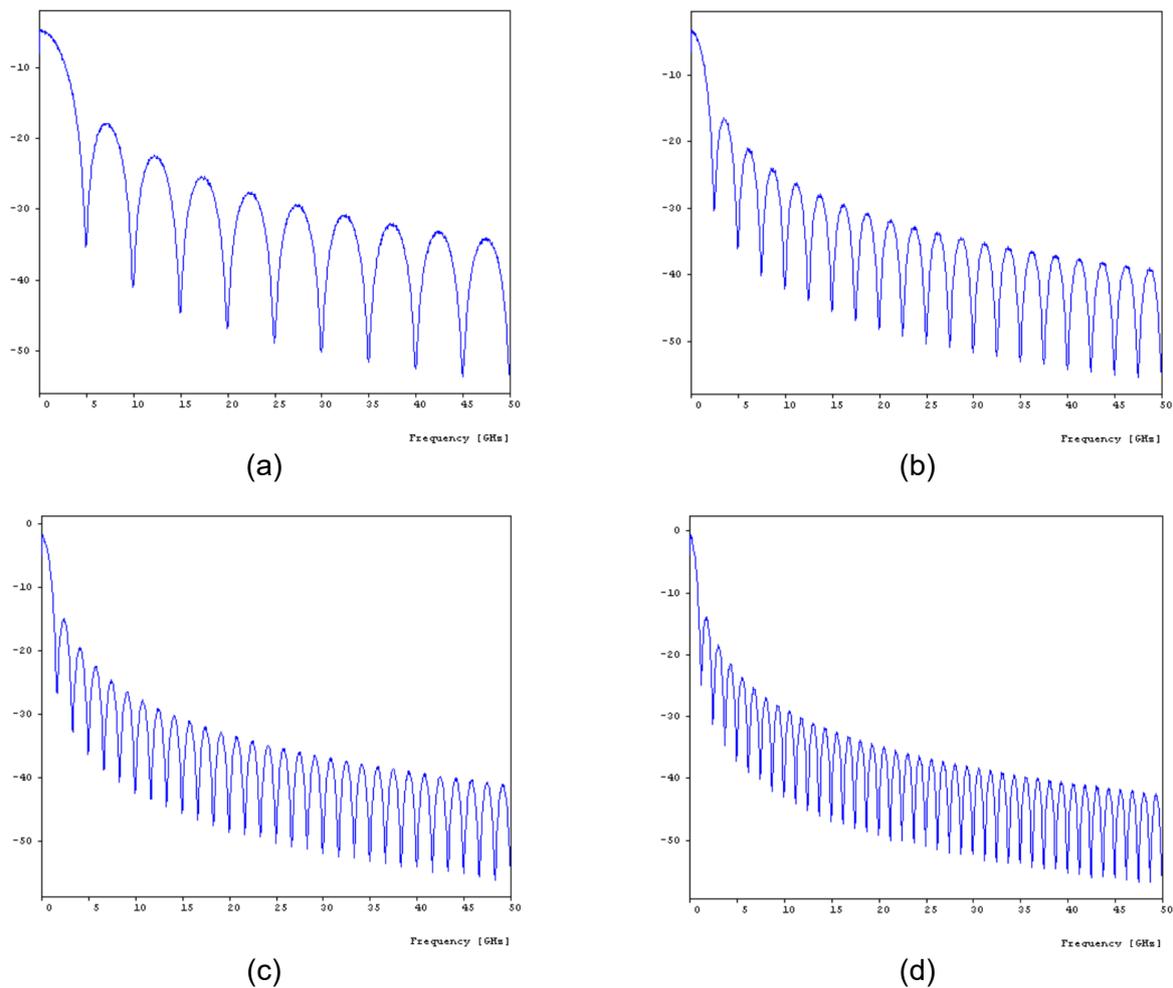


Figura 3.36. Espectro de la señal M-QAM recibida, en cuadratura (a) QPSK (b) 16-QAM (c) 64-QAM (d) 256-QAM.

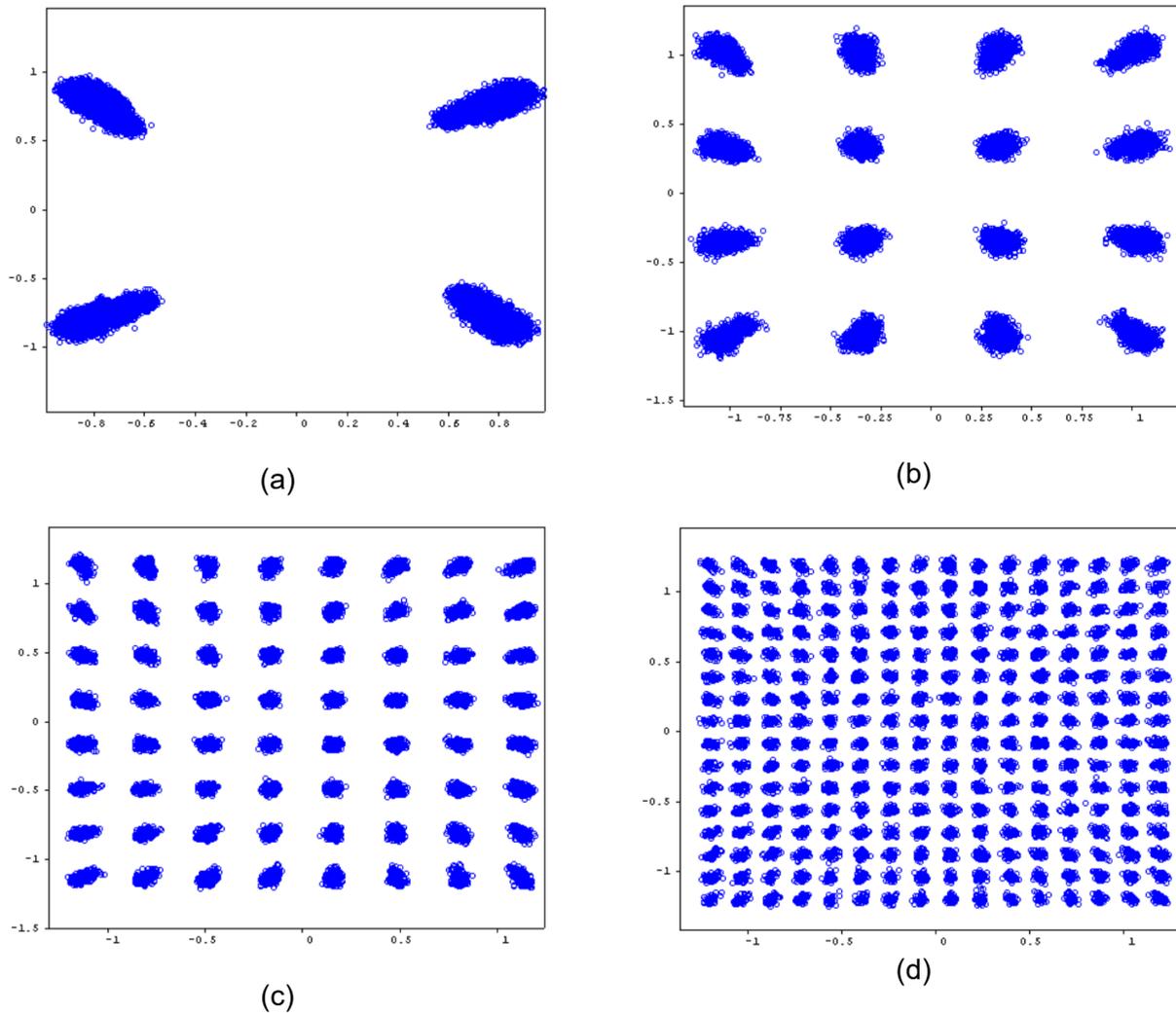


Figura 3.37. Diagramas de constelación obtenidos (a) QPSK (b) 16-QAM (c) 64-QAM (d) 256-QAM.

En los espectros de la Figura 3.36, se ve que no existe una gran diferencia en comparación con los espectros obtenidos en transmisión (Véase Figura 3.23), incluso ni siquiera se evidencia atenuación debido a la ganancia provocada por el bloque *FFT-OFDM*, ni pérdida de la forma de los lóbulos, lo que indica una correcta demodulación de símbolos OFDM a símbolos QAM, particularmente porque se observa de forma clara que el ancho de los lóbulos de los símbolos QAM, asociados a los diferentes niveles de modulación, tiene un valor igual a los generados en transmisión, es decir, cuando se trata de QPSK el ancho del lóbulo es 5 GHz, cuando es 16-QAM el ancho corresponde a 2.5 GHz, si se trata de 64-QAM el lóbulo tiene un ancho de 1.667 GHz, y si corresponde a 156-QAM el ancho es de 1.25 GHz. Lo anterior permite concluir que las condiciones están dadas para una correcta recuperación de la información.

En cuanto a los diagramas de constelación ilustrados en la Figura 3.36, para el caso de QPSK es evidente que corresponde al esquema de modulación que más presenta dispersión en la ubicación de los puntos que encierran los diferentes símbolos de referencia, sin embargo, al poseer un alfabeto de únicamente 4 símbolos, esta dispersión no afecta la región de decisión de ningún símbolo adyacente, lo cual indica que la información se recupera exitosamente; en relación a 16-QAM, éste presenta una menor dispersión en los puntos que QPSK debido a

que tiene un alfabeto de mayor orden, de 16 símbolos, y tal como se aprecia en su diagrama de constelación, no existe ningún símbolo cuya representación en el plano complejo interfiera con la región de decisión de algún símbolo adyacente, dando por hecha una correcta recuperación de la información; ahora bien, para el caso de 64-QAM, el gráfico indica que existe una menor dispersión en los puntos que rodean a los 64 símbolos del alfabeto, en comparación a QPSK y 16-QAM, además, se observa que todos los puntos se encuentran en una región de decisión clara y que no existe riesgo de pérdida de información; finalmente, para 256-QAM se aprecia que es el esquema donde los símbolos interpretados presentan una menor dispersión o margen de error, pero teniendo en cuenta que al ser un alfabeto de 256 símbolos cuyo diagrama de constelación se encuentra normalizado, la distancia entre símbolos adyacentes se hace muy pequeña en comparación a los otros formatos de modulación empleados, y a pesar de tener un menor margen de error que QPSK, 16QAM y 64-QAM, existe la posibilidad de que éstos se confundan en regiones de decisión de símbolos adyacentes, tal como se aprecia en su diagrama de constelación asociado donde es evidente que existen símbolos interpretados que no se encuentran en una región de decisión clara, o que pueden interferir en el futuro proceso de decisión, lo que indica que, según su diagrama de constelación, no se garantiza una óptima recuperación de la información.

Los símbolos M-QAM en fase y en cuadratura ingresan al componente *DEMODO-QAM* que mediante un proceso de mapeo inverso tipo *Gray*, genera como salida una secuencia de flujos de bits en paralelo, donde el número de flujos depende del formato de modulación utilizado. Este elemento es uno de los más importantes dentro del proceso de simulación, debido a que proporciona la medida del parámetro EVM, el cual está asociado a la calidad de recuperación de la señal.

Los símbolos QAM, o bien, señal eléctrica QAM, en cuadratura, asociados al esquema de modulación 256-QAM se ilustran en la Figura 3.38, y los flujos de bits generados por la demodulación se muestran en la Figura 3.39, mientras que los resultados obtenidos en relación al parámetro EVM se listan en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6. Resultados de EVM vs formato de modulación, a 5 Km de distancia.

Formato de modulación	QPSK	16-QAM	64-QAM	256-QAM
EVM [%]	16,73 %	9,5 %	5,83 %	7,2 %

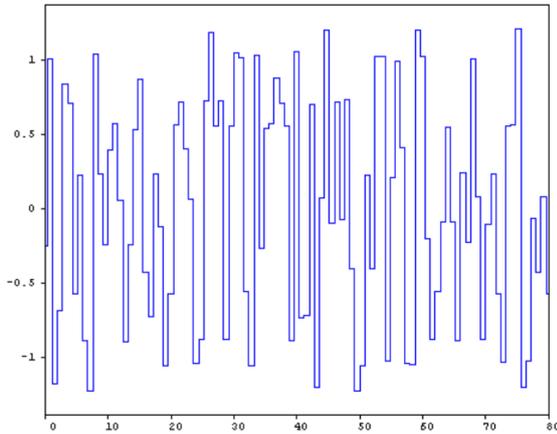


Figura 3.38. Símbolos QAM en recibidos, en cuadratura, y modulados en 256-QAM.



Figura 3.39 Señal digital recibida, demodulada en 256-QAM

Finalmente, los flujos paralelos de bits son puestos en configuración serie, obteniendo así una réplica, muy confiable, de la secuencia de datos original.

En las Figuras 3.38 y 3.39, se evidencia que no existe ningún tipo de retardo, ni en la señal eléctrica QAM en cuadratura, ni en los flujos de bits de salida, para ese esquema de modulación en particular; misma situación ocurre cuando se emplean los demás formatos de modulación, lo que significa que en general la técnica M-QAM no incide significativamente en el sistema en términos de retardo.

Ahora bien, si se compara los valores de EVM obtenidos con los valores umbrales definidos en los sistemas móviles 5G (Véase Tabla 3.1), se evidencia que se cumple la condición para los formatos QPSK, 16-QAM y 64-QAM, resultados coherentes si se observa sus diagramas de constelación asociados, caso contrario para el esquema 256-QAM cuyo valor obtenido se encuentra 3.7 % por encima del mínimo requerido, lo cual tiene sentido si se observa su diagrama de constelación asociado, donde se aprecia que existen símbolos que no se encuentran en una región de decisión clara, dificultando la interpretación de los datos.

En conclusión, para la red diseñada y para una distancia de 5Km de enlace óptico, los formatos QPSK, 16-QAM y 64-QAM cumplen con las condiciones estipuladas en el estándar 5G, mientras que el esquema 256-QAM no garantiza la correcta recuperación de la información; por lo tanto, para los esquemas QPSK, 16-QAM y 64-QAM se simulará con distancias mayores a 5 Km, a escala de 1 Km, con el objetivo de encontrar el punto donde ya no se cumplan las condiciones del *Release*, mientras que para 256-QAM se utilizarán distancias menores a 5 Km, a escala de 1 Km, en aras del mismo objetivo. A continuación, se presentan los resultados obtenidos al variar el parámetro de distancia.

En la Tabla 3.7 se presentan los resultados obtenidos del parámetro *EVM* en relación a diferentes valores de distancia y los diferentes formatos de modulación utilizados.

Tabla 3.7. Resultados de EVM bajo una topología punto a punto.

d [Km]	QPSK	16-QAM	64-QAM	256-QAM
1	----	----	----	4,61
2	----	----	----	4,9
3	----	----	----	6,29
4	----	----	----	7,07
5	16,73	9,5	5,83	7,2
6	16,34	8,7	5,1	----
7	15,18	7,94	5,28	----
8	14,78	8,04	5,77	----
9	15,86	8,86	6,83	----
10	17,28	10,34	8,6	----
11	18,79	11,07	9,8	----
12	22,37	14,3	11,02	----
13	26,6	14,34	----	----
14	35,48	21,03	----	----
15	41,01	----	----	----

Antes de entrar en detalle de análisis, es muy importante mencionar que los valores mínimos requeridos de EVM que propone el estándar 5G (Véase Tabla 3.1) son para sistemas que operen en cualquier rango de frecuencia, sin embargo, para el rango FR2, es decir, las ondas MMW, el *Release* no contempla el uso del formato de modulación 256-QAM y sugiere el uso de únicamente QPSK, 16-QAM y 64-QAM.

Tomando como referencia el cuadro de resultados de EVM, es evidente que el formato de modulación 16-QAM es el que mejor desempeño presenta en la topología punto a punto debido a que soporta hasta 11 Km de distancia en términos de una correcta interpretación de los datos; el esquema QPSK, por su parte, presenta un buen rendimiento ya que logra una distancia de 10 Km garantizando una buena recuperación; así mismo, se evidencia que para

64-QAM, se recupera correctamente la información para recorridos menores o iguales a 9 Km; mientras que para 256-QAM, el sistema no es capaz de garantizar una correcta interpretación de los datos ni para 1 Km de enlace óptico, resultados coherentes si se tiene en cuenta que el sistema opera en la banda n.257 del rango FR2, donde ni siquiera se contempla el formato de modulación 256-QAM, siendo exclusivo del rango FR1.

En la Figura 3.40 se ilustra el comportamiento del parámetro EVM en relación a la longitud del enlace de fibra, para los 3 esquemas que presentaron buenos resultados, y para distancias entre 5 y 14 Km; es importante resaltar que la variación del EVM en cuanto a distancias consecutivas muchas veces no sigue un patrón definido donde se presente un mejor rendimiento para distancias más cortas, situación que se observa tanto en QPSK, donde en vez de aumentar, disminuyó entre 5 y 8 Km, como en 16-QAM, donde disminuyó, en lugar de haber aumentado, para distancias entre 5 y 7 Km, como también, en 64-QAM donde disminuyó cuando se pasó de 5 Km a 6 Km. Lo anterior puede relacionarse con la naturaleza estocástica que caracteriza a la función de transferencia cuántica que emplea la herramienta *OptSim* dentro de los modelos de canal óptico.

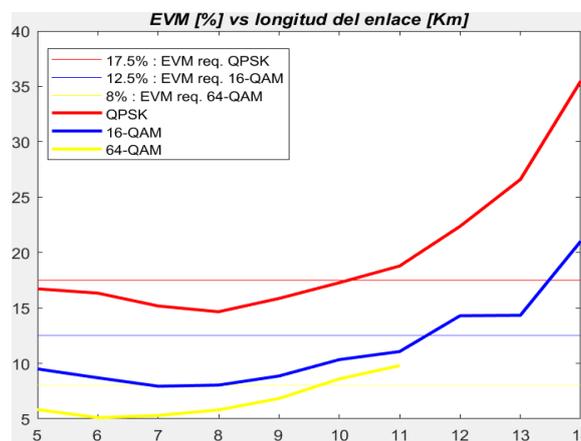


Figura 3.40 Resultados de EVM vs longitud del enlace.

En la Figura 3.41 se muestra el comportamiento del esquema 256-QAM en términos de EVM vs longitud del enlace, tomando como referencia distancias entre 1 y 5 Km. En este caso, el comportamiento en relación a la longitud del enlace sí obedece a un patrón definido, donde a distancias mayores se presenta un menor desempeño en términos de EVM.

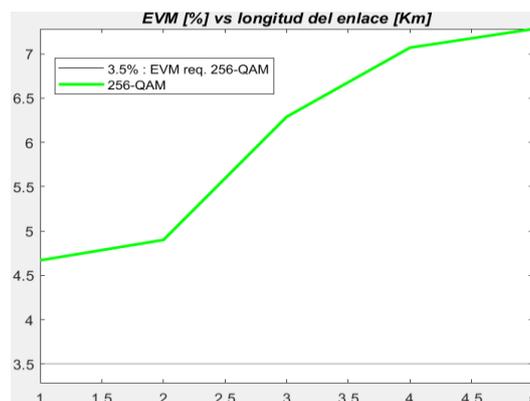


Figura 3.41 Resultados de EVM vs longitud del enlace para 256-QAM.

En conclusión, para el sistema RoF operando con topología punto a punto se presenta un mejor desempeño en 16-QAM alcanzando 11 Km de distancia, seguido del esquema QPSK el cual soporta hasta 10 Km, seguido del esquema 64-QAM donde se logró 9 Km, dejando en último lugar al esquema 256-QAM donde no se alcanzó un desempeño aceptable en ningún valor de distancia evaluado. Lo anterior, considerando las condiciones que sugiere el *Release 15* de sistemas 5G.

Ahora bien, tal como se mencionó anteriormente, es posible realizar otro análisis de resultados a partir de una perspectiva diferente, una perspectiva donde la distancia máxima alcanzada para garantizar una correcta recuperación de los datos, corresponde al valor donde el sistema tenga por lo menos una BER de 10^{-3} . Por lo cual, en el siguiente cuadro se presentan los valores de BER obtenidos a partir de los valores de EVM de la Tabla 3.8, a partir del supuesto que se modela sobre un canal AWGN.

Tabla 3.8. Resultados de BER bajo una topología punto a punto.

d [Km]	QPSK	16-QAM	64-QAM	256-QAM
1	----	----	----	0,066
2	----	----	----	0,1
3	----	----	----	0,317
4	----	----	----	0,468
5	$5,29 \times 10^{-7}$	$9,4 \times 10^{-7}$	$5,3 \times 10^{-5}$	0,511
6	$2,91 \times 10^{-7}$	$1,03 \times 10^{-7}$	$5,49 \times 10^{-6}$	----
7	$3,75 \times 10^{-8}$	$6,6 \times 10^{-8}$	$1,12 \times 10^{-5}$	----
8	$1,28 \times 10^{-8}$	$9,98 \times 10^{-8}$	$4,91 \times 10^{-5}$	----
9	$1,31 \times 10^{-7}$	$1,68 \times 10^{-7}$	$4,08 \times 10^{-4}$	----
10	$1,15 \times 10^{-6}$	$5,72 \times 10^{-6}$	$3,26 \times 10^{-3}$	----
11	$6,95 \times 10^{-6}$	2×10^{-5}	$7,57 \times 10^{-3}$	----
12	$1,13 \times 10^{-4}$	$6,61 \times 10^{-4}$	$13,9 \times 10^{-3}$	----
13	$1,07 \times 10^{-3}$	$6,81 \times 10^{-4}$	----	----
14	$10,7 \times 10^{-3}$	$12,55 \times 10^{-3}$	----	----
15	$23,23 \times 10^{-3}$	----	----	----

Según el cuadro anterior, el formato 256-QAM no presenta una BER aceptable ni para 1 Km de distancia, siendo en este caso de 66×10^{-3} , lo que significa que por cada 1000 bits transmitidos hay 66 bits errados. Ahora bien, en el caso de 64-QAM se obtuvo una BER aceptable hasta 9 Km de distancia, aunque se observa que para 10 Km existe una BER un poco más alta que el valor máximo permitido, de valor $3,26 \times 10^{-3}$, lo cual indica que se podría alcanzar una distancia más cercana a los 10 Km, que los 9 Km ya obtenidos. En cuanto al esquema 16-QAM, se evidencia que es el que mejor desempeño presenta en términos de BER donde se alcanza una distancia de 13 Km. Por último, para el caso de QPSK se observa que hasta una distancia de 12 Km se garantiza una buena recuperación de los datos, sin embargo, la medida obtenida para 13 Km sobrepasa el límite máximo de 10^{-3} por una cantidad muy mínima, lo que implicaría que para esta situación, con una BER de $1,07 \times 10^{-3}$, también sería posible una buena recuperación de la información. En general, en la Figura 11.0 se ilustra el comportamiento de la BER, en términos de longitud del enlace, para los esquemas de modulación QPSK, 16-QAM y 64-QAM, donde se evidencia lo descrito anteriormente.

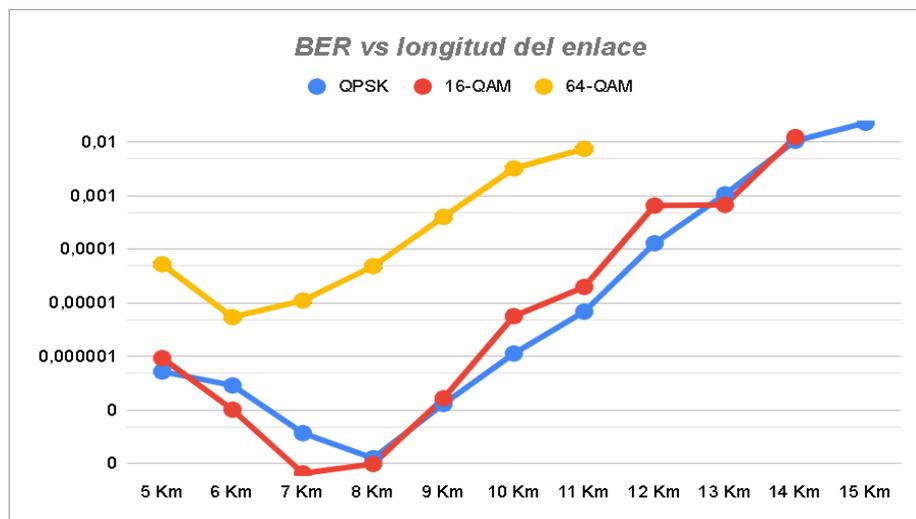


Figura 3.42. Resultados de BER vs longitud del enlace para QPSK, 16-QAM y 64-QAM.

Al comparar los valores de distancia obtenidos bajo ambas perspectivas, se evidencia que si se estudia el sistema en relación a la BER y se establece un límite máximo de 10^{-3} , se puede alcanzar una mayor distancia a la alcanzada cuando se condiciona el sistema a los valores mínimos de EVM que estipula el estándar 5G, exceptuando 64-QAM donde la distancia alcanzada se mantiene igual, y sin tomar en cuenta el formato 256-QAM ya que bajo ninguna perspectiva alcanza resultados aceptables. Sin embargo, al ser la BER una medida encontrada a partir de una formulación matemática (Véase Anexo C), es de particular interés analizar si los valores de BER, obtenidos a partir de los valores de EVM, son congruentes o razonables con el diagrama de constelación asociado a cada esquema de modulación, en particular, para el análisis comparativo se toman como referencia los valores de distancia más relevantes de cada caso.

Respecto al formato de modulación QPSK, en la Tabla 3.7 se observa que se alcanza un buen rendimiento hasta los 10 Km de distancia, bajo las condiciones del estándar 5G, mientras que si se analiza el desempeño en términos de la BER (Véase Tabla 3.8) se garantiza un buen rendimiento hasta 12 Km, pudiéndose aumentar a 13 Km si se tiene en cuenta que se obtuvo una BER de $1,07 \times 10^{-3}$ en ese punto, caso contrario al valor obtenido cuando se transmitió a una distancia de 15 Km, donde el EVM fue el valor más alto registrado,

estando cerca del 50%. A continuación, se ilustran los diagramas de constelación asociados a cada caso.

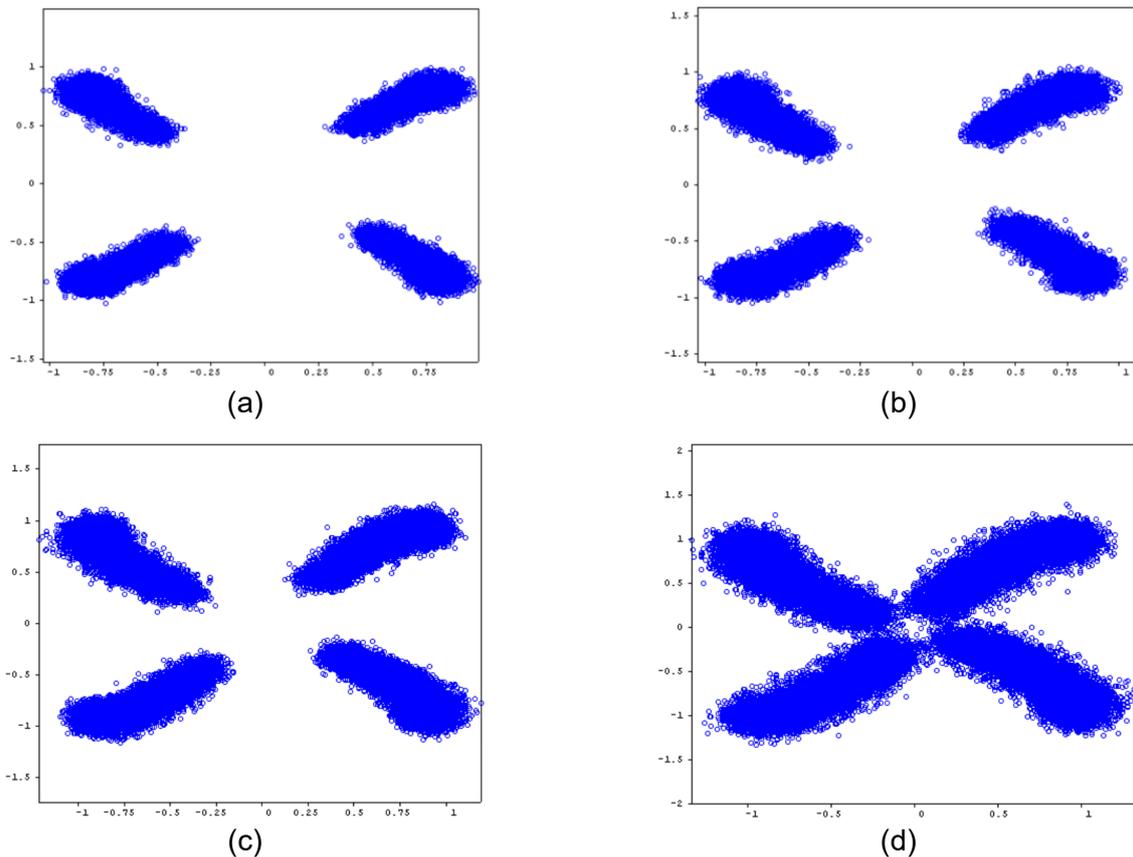


Figura 3.43 Diagramas de constelación obtenidos para QPSK (a) 10 Km (b) 12 Km (c) 13 Km (d) 15 Km.

En la Figura 3.43 se aprecia que para el caso de 10 Km, donde se obtuvo un EVM de 17,8% y una BER de $1,15 \times 10^{-6}$, el diagrama de constelación es muy claro diferenciándose notoriamente cada ráfaga de símbolos recibidos, evidenciando que no existe riesgo de pérdida de información; este valor de distancia es el máximo alcanzado bajo las condiciones del estándar 5G. En cuanto al desempeño logrado a una distancia de 12 Km, donde el EVM fue de 18,79% y la BER de $6,95 \times 10^{-6}$, se aprecia que a pesar de ser más disperso que el diagrama de constelación de 10 Km, no hay ningún símbolo interpretado que pudiese interferir en alguna región de decisión adyacente, lo cual indica que es posible recuperar la información exitosamente; sin embargo, para este valor de distancia ya no se cumplen las condiciones del *Release 15*. Ahora bien, para una longitud del enlace de fibra de 13 Km, donde se obtuvo un EVM de 26,6% y una BER de $1,07 \times 10^{-3}$, los símbolos interpretados dentro del plano complejo presentan una mayor dispersión que los casos anteriores, produciendo un aumento en el área asociada a cada una de las cuatro regiones de decisión, además, se aprecia que varios símbolos recibidos se empiezan a interpretar de forma aislada respecto a su respectivo símbolo de referencia, sin embargo, a pesar de lo anterior sería posible una correcta recuperación de los datos; cabe resaltar que para esta distancia ya no se cumplen las condiciones del *Release 15* ni la condición de máxima BER permitida, pero considerando esta última medida, el valor obtenido fue muy cercano, lo cual indica que existe un desempeño físico aceptable, afirmación que resulta coherente si se observa su diagrama de constelación asociado. Finalmente, para el caso de 15 Km, donde se obtuvo un EVM de 41,01% y una

BER de $23,23 \times 10^{-3}$, es notorio ver cómo la dispersión de los símbolos interpretados es tan grande que ocasiona un aumento significativo en las áreas asociadas a las diferentes regiones de decisión, causando que una gran cantidad de símbolos interpretados interfieran en las regiones de decisión adyacentes, lo cual obstaculiza en gran medida el futuro proceso de decisión, donde la información no podrá ser recuperada exitosamente.

Respecto al formato de modulación 16-QAM, es aquel que mejor desempeño presenta en la topología punto a punto según ambas perspectivas, ya que se obtuvo un valor de distancia máxima de 11 Km al considerar las condiciones mínimas de EVM requerido, y un valor de distancia máxima de 13 Km al considerar como valor aceptable una BER de 10^{-3} . En particular, es de interés estudiar los diagramas de constelación asociados a los valores de distancia más críticos, es decir, 11, 12, 13 y 14 Km, tal como se indica en la siguiente ilustración:

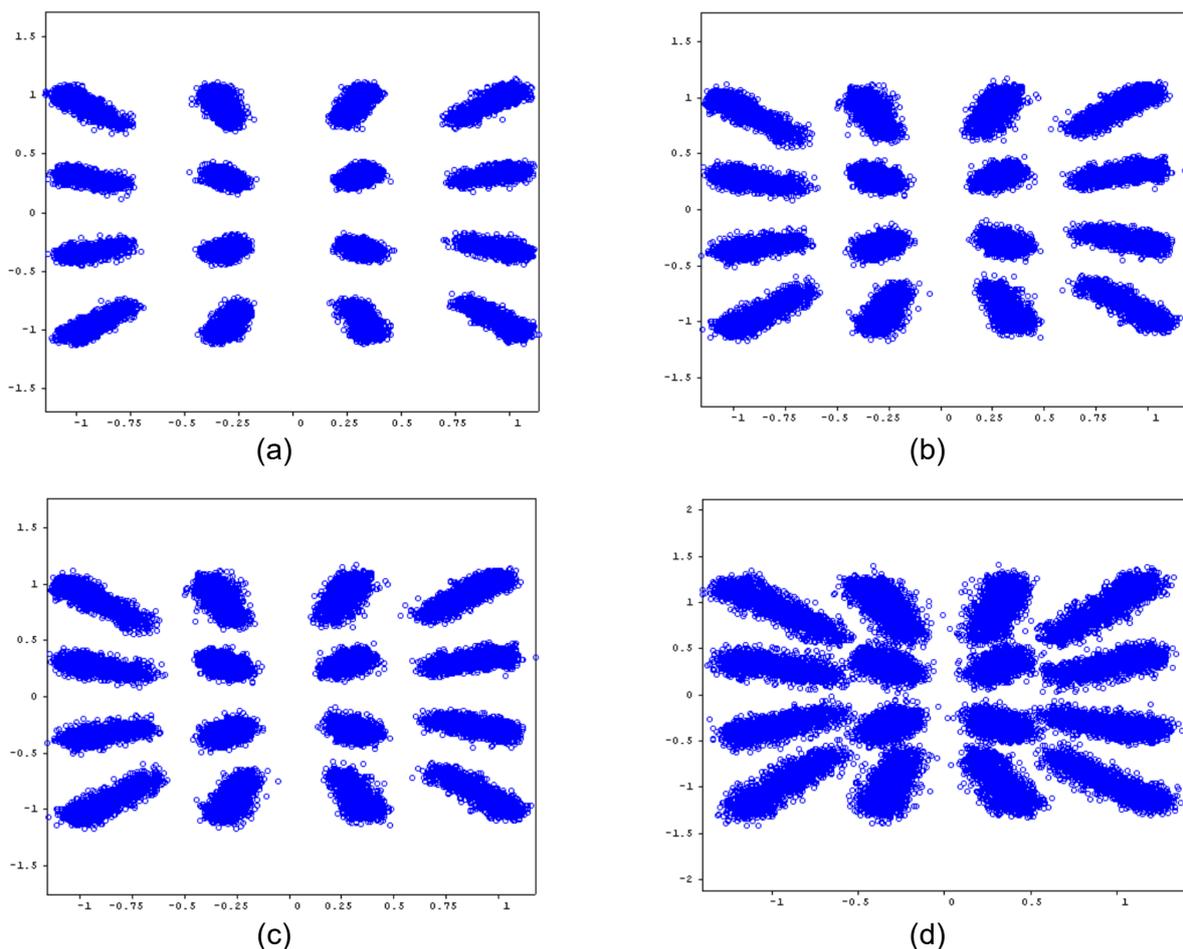


Figura 3.44 Diagramas de constelación obtenidos para 16-QAM (a) 11 Km (b) 12 Km (c) 13 Km (d) 14 Km.

Para el caso de 11 Km de longitud del enlace, se aprecia en su diagrama de constelación asociado que los símbolos recibidos se encuentran perfectamente ubicados en sus respectivas regiones de decisión, salvo muy pocos puntos aislados, garantizando un buen desempeño en términos de recuperación de información, en particular, se obtuvo un EVM de 11,07% y una BER de 2×10^{-5} , siendo el último valor de distancia en donde se cumplen las condiciones estipuladas en el *Release*. En cuanto al desempeño alcanzado a una distancia

de 12 Km, donde se obtuvo un EVM de 14,3% y una BER de $6,6 \times 10^{-4}$, se puede apreciar en su diagrama de constelación asociado que existe una dispersión mucho mayor en cada uno de los 16 símbolos de referencia en comparación a cuando se propagó a 11 Km de distancia, además es notorio ver cómo las áreas de las regiones de decisión aumentaron en gran medida respecto al caso anterior, aunque sin interferir en el proceso de decisión de los demás símbolos de referencia, lo que garantiza una correcta recuperación de la información, a pesar de no cumplir con la condición del estándar 5G. Por otra parte, cuando se transmitió para una distancia de 13 Km, donde se obtuvo un EVM de 14,34% y una BER de $6,8 \times 10^{-4}$, el diagrama de constelación prácticamente ni se modificó en comparación al obtenido en 12 Km, presentando valores muy similares, tanto de EVM, donde no se alcanzan las condiciones mínimas, como de BER, donde sí se encuentra dentro de las condiciones que garantizan un buen desempeño. Finalmente, para el caso de 14 Km, donde se obtuvo un EVM de 21,03% y una BER de $12,5 \times 10^{-3}$, es posible apreciar que el diagrama de constelación asociado no es claro, ni mucho menos garantiza un buen desempeño en términos de recuperación de datos, debido al gran margen de error asociado a cada punto interpretado donde es evidente que existe una interferencia muy significativa entre la región de decisión de cada símbolo de referencia con sus respectivas regiones de decisión adyacentes.

Respecto al formato de modulación 64-QAM, se da la peculiaridad de que la distancia máxima alcanzada bajo las condiciones del estándar 5G es igual a la alcanzada para una BER de 10^{-3} , siendo el único esquema que se comporta de dicha manera, en particular, para una longitud del enlace de fibra de 9 Km se obtuvo un EVM de 6,83% y una BER de $4,08 \times 10^{-4}$, mientras que si se transmite 1 Km más lejos se presentan medidas de 8,6% y $3,26 \times 10^{-3}$, respectivamente. Para el análisis de los diagramas de constelación, tal como en los anteriores casos, se evalúan las distancias más críticas, es decir, 9 y 10 Km, tal como se ilustra a continuación:

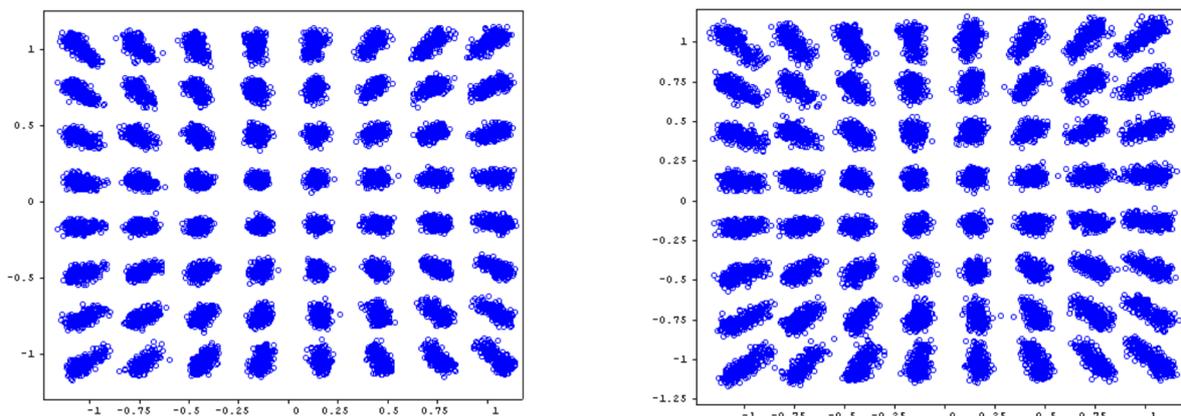


Figura 3.45. Diagramas de constelación obtenidos para 64-QAM (a) 9 Km (b) 10 Km.

En la Figura 3.45, se evidencia que para 9 Km, los símbolos interpretados en el plano complejo se encuentran muy bien ubicados dentro de cada región de decisión asociada a los símbolos de referencia, lo cual indica que se recupera la información en óptimas condiciones, caso contrario a cuando la longitud del enlace óptico es de 10 Km, donde es posible apreciar, en su diagrama de constelación asociado, una dispersión de los puntos recibidos mucho más significativa que para 9 Km, lo que produce que no se cumplan las condiciones mínimas para garantizar un buen desempeño, en especial, se observa que algunas regiones de decisión de los símbolos centrales no muestran una interferencia notoria respecto a sus regiones

adyacentes siendo capaz de detectar los símbolos sin mayor inconveniente, mientras que todos los símbolos que se encuentran ubicados sobre el lado exterior del diagrama, son los que presentan una región de decisión mucho más dispersa, interfiriendo con el futuro proceso de decisión de los símbolos de referencia vecinos.

Respecto al formato de modulación 256-QAM, no se presenta un buen rendimiento para ningún valor de distancia evaluado, siendo los mejores resultados para 1Km, y los peores para 5 Km. A continuación, se ilustran los diagramas de constelación obtenidos para las distancias más adecuadas.

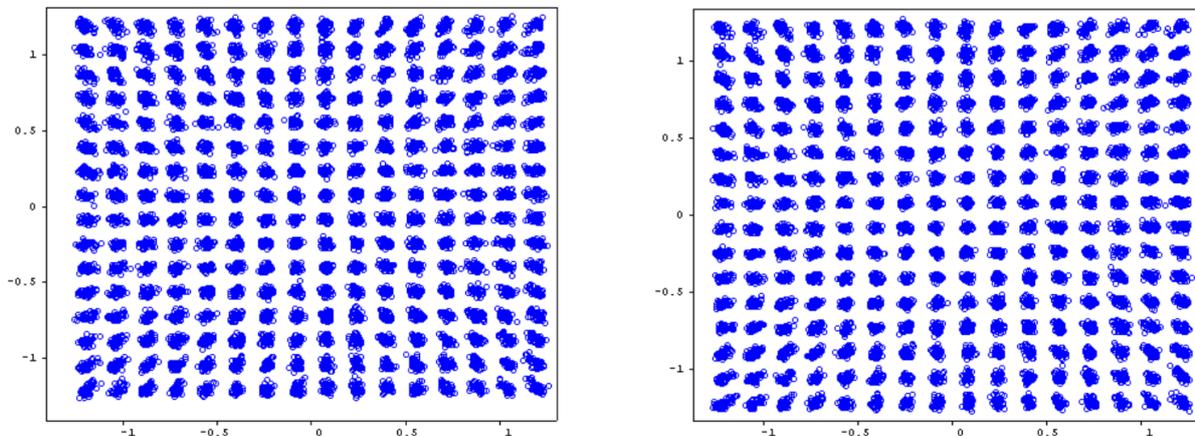


Figura 3.46. Diagramas de constelación obtenidos para 256-QAM (a) 1 Km (b) 2 Km.

En la Figura 3.46, se evidencia que los diagramas de constelación asociados a 1 Km y 2 Km tienen mucha similitud en comparación al diagrama obtenido para 5 Km (Véase Figura 3.37), en donde, al ser constelaciones representadas por un gran cantidad de símbolos y al estar matemáticamente normalizadas, existe una gran probabilidad que el margen de error asociado a cada símbolo de referencia, por pequeño que sea, produzca que un símbolo interpretado se sitúe en una región de decisión diferente a la que le corresponde, lo que puede producir una cantidad importante de bits errados. Este fenómeno, tal como se mencionó anteriormente, cobra sentido si se considera que el *Release 15* no contempla el uso de este formato de modulación cuando se transmite mediante ondas MMW.

Hasta este punto, se ha analizado el sistema en términos de tres parámetros de evaluación: EVM, BER y diagramas de constelación. Por consiguiente, en la Tabla 3.9 se muestran los resultados obtenidos del parámetro *Potencia Recibida* en relación a las diferentes longitudes del enlace óptico, donde cabe mencionar que es independiente del formato de modulación utilizado, pero sí depende de los efectos lineales y no lineales asociados a la propagación por fibras ópticas, aunque considerando los valores tan cortos de longitud del enlace, no existe un mayor impacto dentro del desempeño del sistema.

Tabla 3.9. Resultados de potencia de recepción vs distancia.

$d [Km]$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$P_{RX}[dBm]$	-6,3	-6,51	-6,53	-6,79	-6,92	-7,29	-7,43	-7,66	-7,73	-8,08	-8,19	-8,35	-8,53	-8,85	-9,03

3.2.2 PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL SISTEMA RoF PARA UNA TOPOLOGÍA PUNTO A MULTIPUNTO

En este segmento se exponen los resultados obtenidos al simular el sistema RoF configurado con una topología punto a multipunto, específicamente para 2, 4 y 8 usuarios finales.

Para el caso de 2 usuarios finales, las tablas con todos los resultados obtenidos por cada parámetro de evaluación (medible) se encuentran en el Anexo D. En particular, para los formatos QPSK y 16-QAM se encontraron dos valores de distancia soportada, uno que cumple las condiciones mínimas del estándar 5G, y otro que corresponde al punto máximo donde no se supera el límite de BER de 10^{-3} , mientras que para el esquema 64-QAM la distancia alcanzada bajo ambas perspectivas fue la misma, y para el esquema 256-QAM no se encontró ningún punto que satisfaga alguna de las condiciones mínimas estipuladas. A continuación, se presentan las tablas con los resultados obtenidos para cada receptor RoF en relación a la distancia máxima alcanzada.

Tabla 3.10 Resultados obtenidos para el receptor RoF 1, en un arreglo 1-2.

<i>d [Km]</i>	QPSK		16-QAM		64-QAM		256-QAM		<i>P_{RX} [dBm]</i>
	<i>EVM</i>	<i>BER</i>	<i>EVM</i>	<i>BER</i>	<i>EVM</i>	<i>BER</i>	<i>EVM</i>	<i>BER</i>	
1	-----	-----	-----	-----	-----	-----	4,88	0,098	-6,22
9	16,84	$6,2 \times 10^{-7}$	8,94	$2,1 \times 10^{-7}$	7,03	$5,5 \times 10^{-4}$	-----	-----	-7,72
11	19,34	$1,2 \times 10^{-5}$	11,63	$4,5 \times 10^{-5}$	-----	-----	-----	-----	-8,17
12	22,24	$1,2 \times 10^{-4}$	14,33	$6,8 \times 10^{-4}$	-----	-----	-----	-----	-8,37

Tabla 3.11 Resultados obtenidos para el receptor RoF 2, en un arreglo 1-2.

<i>d [Km]</i>	QPSK		16-QAM		64-QAM		256-QAM		<i>P_{RX} [dBm]</i>
	<i>EVM</i>	<i>BER</i>	<i>EVM</i>	<i>BER</i>	<i>EVM</i>	<i>BER</i>	<i>EVM</i>	<i>BER</i>	
1	-----	-----	-----	-----	-----	-----	4,21	0,037	-6,22
9	16,35	$2,9 \times 10^{-7}$	8,95	$2,2 \times 10^{-7}$	6,97	$5,1 \times 10^{-4}$	-----	-----	-7,72
11	19,32	$1,2 \times 10^{-5}$	11,55	$4,0 \times 10^{-5}$	-----	-----	-----	-----	-8,17
12	21,97	$1,0 \times 10^{-4}$	14,12	$5,7 \times 10^{-4}$	-----	-----	-----	-----	-8,37

Los diagramas de constelación asociados a cada punto crítico (distancia máxima alcanzada) se ilustran a continuación, considerando únicamente el receptor que presente un menor rendimiento en términos de EVM y BER.

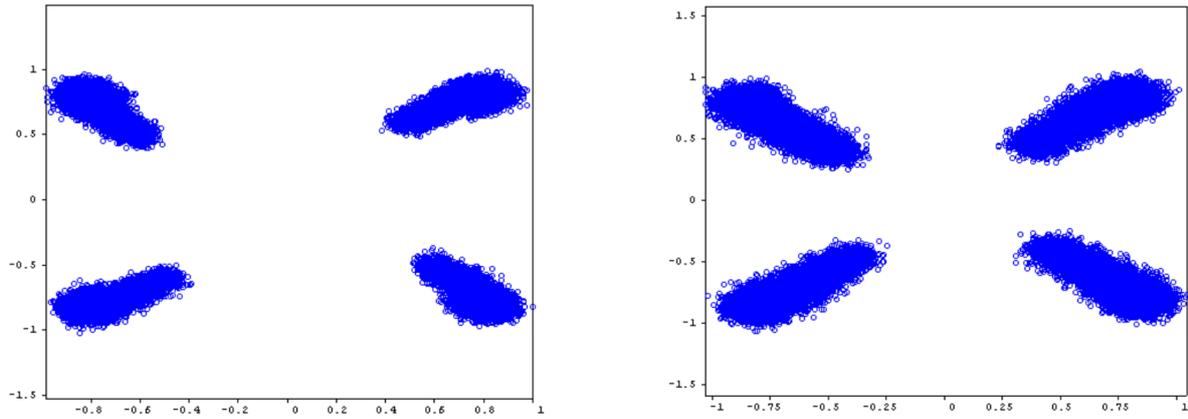


Figura 3.47. (a) Diagrama de constelación QPSK en el RxRoF1 a 9 Km. (b) Diagrama de constelación QPSK en el RxRoF1 a 12 Km.

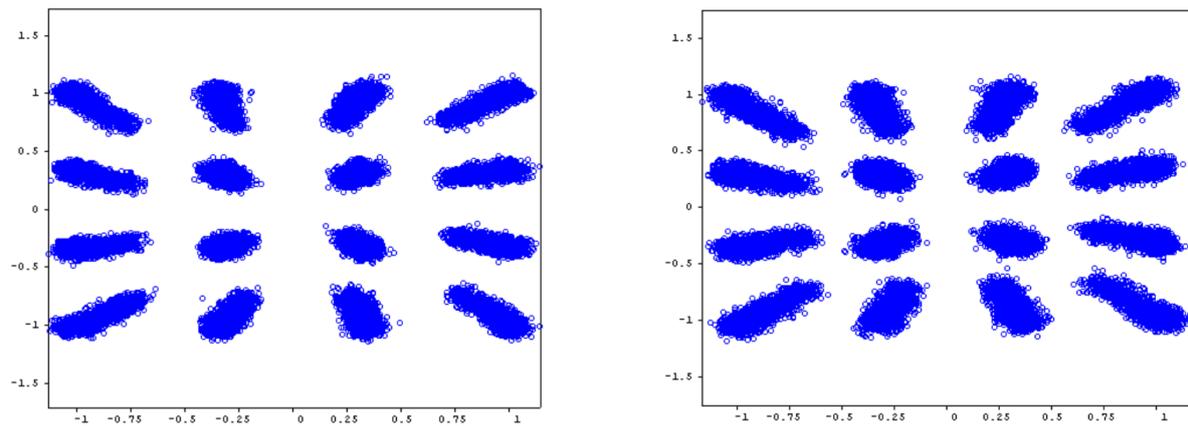


Figura 3.48. (a) Diagrama de constelación 16-QAM en el RxRoF1 a 11 Km. (b) Diagrama de constelación 16-QAM en el RxRoF1 a 12 Km.

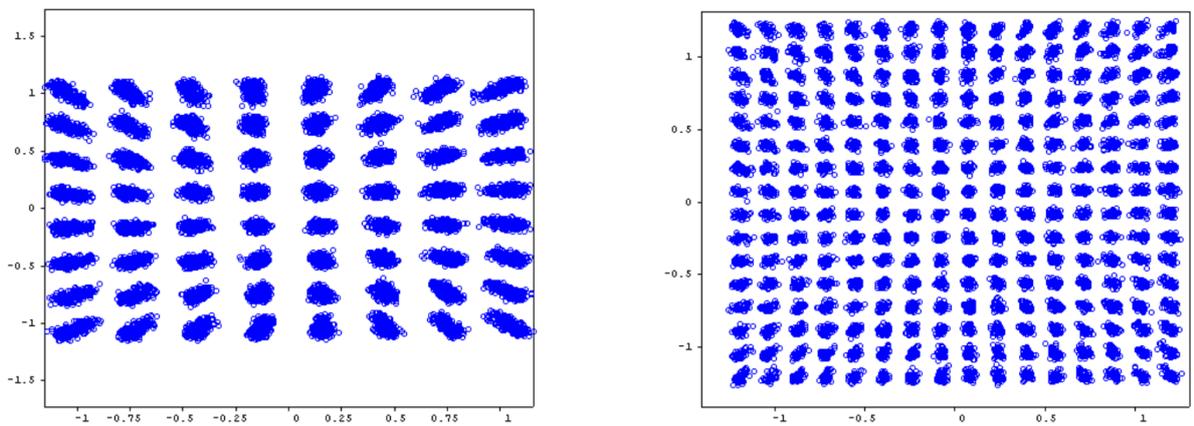


Figura 3.49. (a) Diagrama de constelación 64-QAM en el RxRoF1 a 9 Km. (b) Diagrama de constelación 256-QAM en el RxRoF1 a 1 Km.

Para el arreglo de 2 usuarios finales, se presenta un menor desempeño en términos de BER o EVM que el logrado cuando se configura una topología punto a punto, bajo todos los formatos de modulación estudiados (QPSK, 16-QAM, 64-QAM y 256-QAM).

Empleando QPSK se alcanza una distancia de 9 Km si se analiza el sistema bajo las condiciones del *Release 15*, y una distancia de 12 Km si se compara el valor de BER obtenido con el máximo aceptado, mientras que para la topología p2p el sistema presenta un muy buen rendimiento hasta 10 Km y 12 Km, respectivamente; además, considerando sus diagramas de constelación asociados, es evidente que en ambos casos es posible una correcta recuperación de la información. Para el caso de 16-QAM, los resultados obtenidos indican que se cumple con las condiciones del estándar hasta 11 Km de longitud, y se cumplen las condiciones mínimas de BER para un enlace de 12 Km de distancia, y si se comparan con los resultados obtenidos bajo la topología p2p, en cuanto a las condiciones 5G se alcanza la misma distancia en ambos arreglos, mientras que en términos de BER la longitud del enlace se ve reducida en 1 Km, además, se aprecia en sus diagramas de constelación que los puntos se encuentran bien definidos dentro de su respectiva región de decisión. Ahora bien, para el caso de 64-QAM se presenta una situación diferente a los casos anteriores, debido a que se alcanza una distancia máxima de 9 km bajo cualquier condición, siendo el mismo resultado obtenido en el arreglo p2p, lo cual indica que, en términos comparativos, no existe una mayor descompensación de distancia si se transmite a 1 ó 2 usuarios, así mismo, es posible ver en su diagrama de constelación que no existe riesgo alguno de pérdida. Por último, para el formato de modulación 256-QAM, tal como en el arreglo p2p, la mejor situación se presentó a 1 Km de distancia, aunque si bien el rendimiento es insuficiente.

Para el caso de 4 usuarios finales, las tablas con todos los resultados obtenidos por cada parámetro de evaluación (medible) se encuentran en el Anexo D. En este arreglo, tal como sucedió para 2 usuarios finales, se encontraron dos valores de distancia máxima para los formatos QPSK y 16-QAM en términos de EVM mínimo requerido y de BER máxima permitida, y tal como aconteció con 64-QAM, el valor de distancia máxima fue el mismo bajo ambas perspectivas, mientras que para 256-QAM no se encontró ningún punto que satisfaga los umbrales mínimos establecidos. A continuación, se presentan las tablas con los resultados obtenidos para los dos receptores que menor rendimiento presentaron, en relación a la distancia máxima alcanzada vs EVM/BER.

Tabla 3.12 Resultados para el receptor RoF 2, en un arreglo de 1-4.

<i>d</i>	QPSK		16-QAM		64-QAM		256-QAM		<i>P_{RX}</i> [dBm]
	<i>EVM</i>	<i>BER</i>	<i>EVM</i>	<i>BER</i>	<i>EVM</i>	<i>BER</i>	<i>EVM</i>	<i>BER</i>	
1	-----	-----	-----	-----	-----	-----	4,70	0,078	-6,32
9	16,84	$6,2 \times 10^{-7}$	9,17	$4,0 \times 10^{-7}$	6,89	$4,4 \times 10^{-4}$	-----	-----	-7,71
11	19,15	$1,0 \times 10^{-5}$	11,55	$4,0 \times 10^{-5}$	-----	-----	-----	-----	-8,23
12	22,29	$1,2 \times 10^{-4}$	14,34	$6,8 \times 10^{-4}$	-----	-----	-----	-----	-8,69

Tabla 3.13 Resultados para el receptor RoF 4, en un arreglo de 1-4.

d	QPSK		16-QAM		64-QAM		256-QAM		P_{RX} [dBm]
	EVM	BER	EVM	BER	EVM	BER	EVM	BER	
1	----	----	----	----	----	----	4,35	0,047	-6,32
9	16,81	$6,0 \times 10^{-7}$	9,88	$2,2 \times 10^{-7}$	7,00	$5,3 \times 10^{-4}$	----	----	-7,71
11	19,35	$2,9 \times 10^{-6}$	11,61	$4,4 \times 10^{-5}$	----	----	----	----	-8,23
12	22,50	$1,2 \times 10^{-5}$	14,25	$6,4 \times 10^{-4}$	----	----	----	----	-8,69

Los diagramas de constelación asociados a cada punto crítico (distancia máxima alcanzada) se ilustran a continuación, considerando únicamente el receptor que presente un menor desempeño en términos de EVM y BER, entre los 4 existentes.

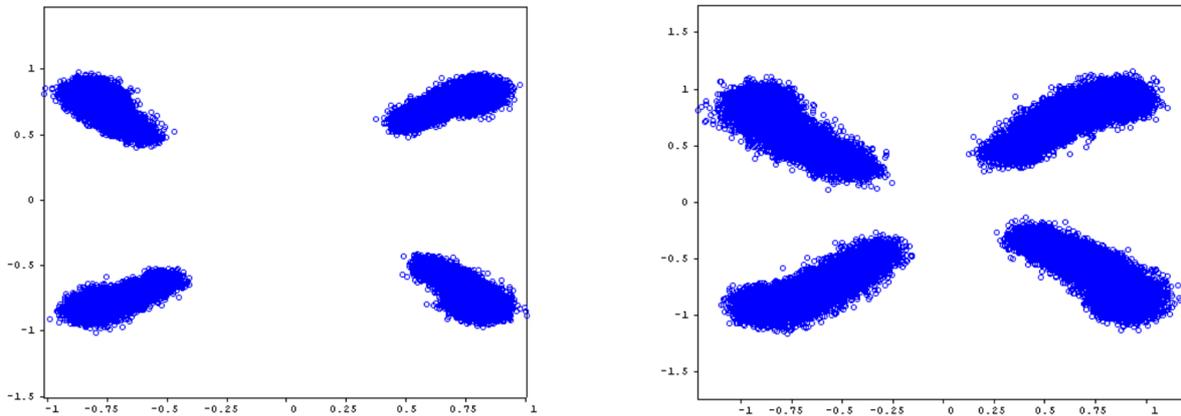


Figura 3.50. (a) Diagrama de constelación QPSK en el RxRoF2 a 9 Km (b) Diagrama de constelación QPSK en el RxRoF3 a 12 Km.

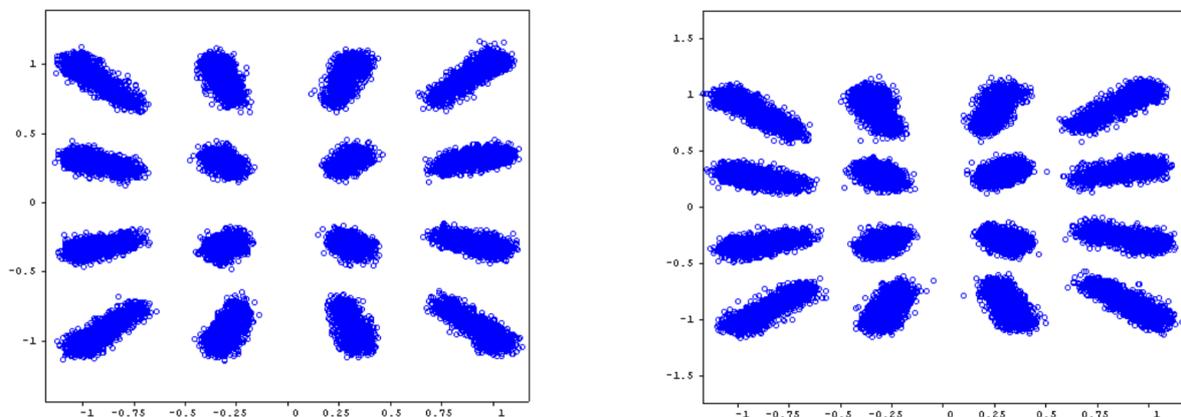


Figura 3.51. (a) Diagrama de constelación 16-QAM en el RxRoF4 a 11 Km (b) Diagrama de constelación 16-QAM en el RxRoF2 a 12 Km.

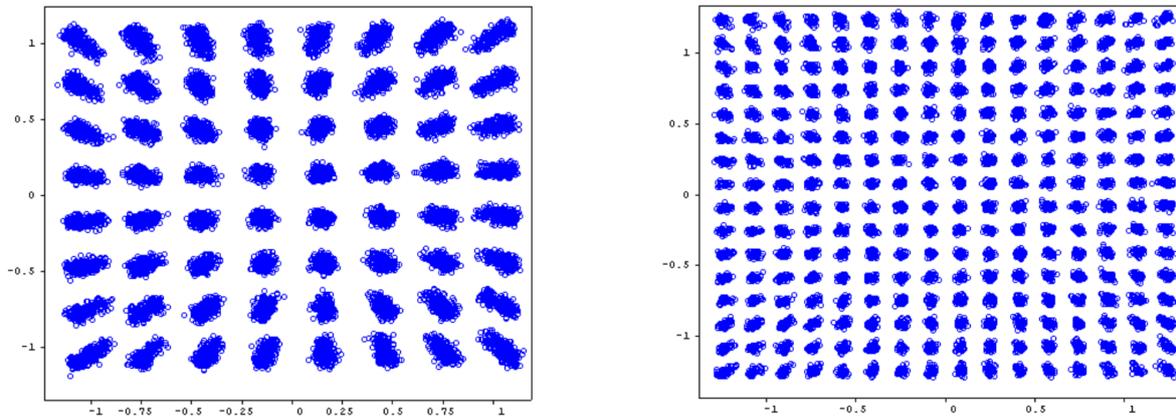


Figura 3.52. (a) Diagrama de constelación 64-QAM en el RxRoF1 a 9 Km. (b) Diagrama de constelación 256-QAM en el RxRoF3 a 1 Km.

Para el arreglo de 4 usuarios, se evidencia que tuvo prácticamente el mismo desempeño que el arreglo para 2 usuarios en términos de distancia alcanzada. Entrando en detalle, el formato QPSK alcanzó un buen desempeño hasta 9 Km basado en las condiciones del estándar móvil, y presentó un mejor desempeño en términos de BER permitida alcanzando hasta 12 Km, misma situación que para la configuración anterior, aunque en este caso, el diagrama de constelación obtenido a 12 Km sí presenta una variación considerable, donde se ve una mayor dispersión en los puntos provocando un aumento del área de decisión de referencia, lo que implica una mayor probabilidad de pérdida de bits, aunque sin llegar a ser demasiado determinante en el futuro proceso de decisión. En cuanto al esquema 16-QAM, también se determinaron dos valores de distancia, 11 Km bajo las condiciones del *Release 15*, y 12 Km si se toma en cuenta el valor permitido de BER, misma situación ocurrida en el anterior arreglo aunque caso contrario a QPSK, los diagramas de constelación son muy similares a los obtenidos para 2 usuarios finales. Ahora bien, para el caso de 64-QAM se mantuvo la misma distancia que las alcanzadas tanto para la topología punto a punto como para el arreglo de 2 usuarios y se obtuvo diagramas de constelación muy similares, lo cual indica que al hacer uso de este formato la red presenta el mismo desempeño, en términos de EVM y BER, ya sea para arreglos de 1, 2 ó 4 usuarios finales. Finalmente, como en todos los casos anteriores, el esquema de modulación 256-QAM presentó medidas irregulares hasta para 1 Km de distancia, donde existe la posibilidad de tener 95 bits errados por cada 1000 bits transmitidos.

Para el caso de 8 usuarios finales, las tablas con los resultados obtenidos por cada parámetro de evaluación (medible) se encuentran en el Anexo D. Los resultados indican que bajo las dos perspectivas estudiadas (EVM y BER), se alcanzan dos diferentes valores de alcance máximo para los formatos QPSK y 16-QAM, mientras que para los esquemas 64-QAM y 256-QAM se alcanza un único valor, aunque en el caso de este último, no se presenta un buen desempeño con ningún valor de distancia evaluado. A continuación, se presentan los resultados para los receptores que menor rendimiento presente, según los valores obtenidos de EVM/BER para las distancias máximas alcanzadas.

Tabla 3.14. Resultados para el receptor RoF 1, en un arreglo de 1-8.

d [Km]	QPSK		16-QAM		64-QAM		256-QAM		P_{RX} [dBm]
	EVM	BER	EVM	BER	EVM	BER	EVM	BER	
1	----	----	----	----	----	----	5,00	0,112	-6,41
9	17,10	$9,0 \times 10^{-7}$	10,09	$3,5 \times 10^{-7}$	7,50	$1,0 \times 10^{-3}$	----	----	-7,81
10	19,61	$1,56 \times 10^{-5}$	11,45	$3,52 \times 10^{-6}$	9,01	$4,5 \times 10^{-3}$	----	----	-8,09
11	24,12	$3,5 \times 10^{-4}$	12,31	$1,0 \times 10^{-4}$	----	----	----	----	-8,27
12	33,24	$7,0 \times 10^{-3}$	14,85	$9,7 \times 10^{-4}$	----	----	----	----	-8,66

Tabla 3.15 Resultados para el receptor RoF 6, en un arreglo de 1-8.

d [Km]	QPSK		16-QAM		64-QAM		256-QAM		P_{RX} [dBm]
	EVM	BER	EVM	BER	EVM	BER	EVM	BER	
1	----	----	----	----	----	----	4,64	0,072	-6,41
9	16,95	$7,3 \times 10^{-6}$	8,95	$2,2 \times 10^{-7}$	7,33	$8,4 \times 10^{-4}$	----	----	-7,81
10	20,00	$2,2 \times 10^{-5}$	10,46	$7,15 \times 10^{-5}$	9,12	$8,2 \times 10^{-3}$	----	----	-8,09
11	24,52	$4,3 \times 10^{-4}$	12,22	$9,5 \times 10^{-5}$	----	----	----	----	-8,27
12	35,97	$1,1 \times 10^{-2}$	14,78	$9,8 \times 10^{-4}$	----	----	----	----	-8,66

Los diagramas de constelación asociados a cada punto crítico (distancia máxima alcanzada) se ilustran a continuación, considerando únicamente el receptor que presente un menor desempeño en términos de EVM y BER, entre los 8 existentes.

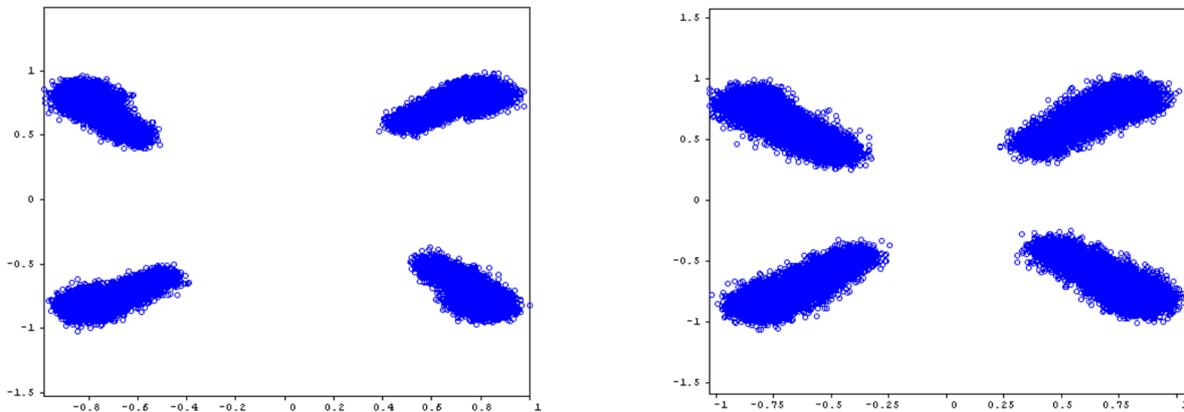


Figura 3.53. (a) Diagrama de constelación QPSK en el RxRoF6 a 9 Km. (b) Diagrama de constelación QPSK obtenido en el RxRoF6 a 11 Km.

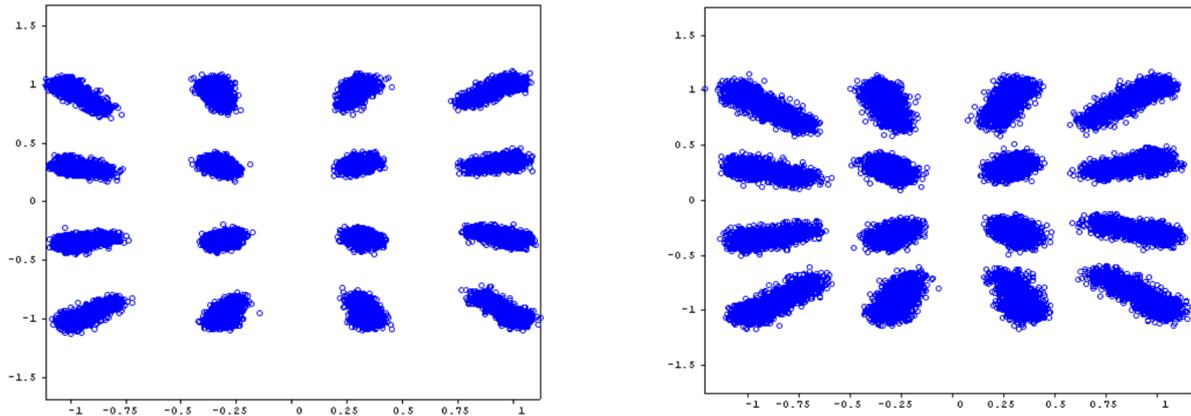


Figura 3.54. (a) Diagrama de constelación 16-QAM en el RxRoF1 a 11 Km (b) Diagrama de constelación 16-QAM en el RxRoF6 a 12 Km.

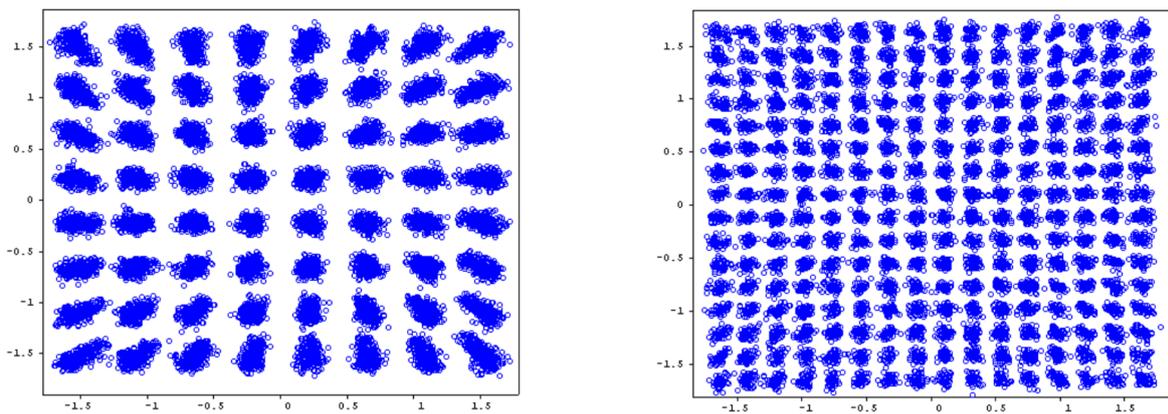


Figura 3.55. (a) Diagrama de constelación 64-QAM a 9 Km para la RxRoF6. (b) Diagrama de constelación 256-QAM a 1 Km para el RxRoF1.

Según los resultados anteriores, para el arreglo de 8 usuarios se tiene el siguiente comportamiento:

Cuando se emplea QPSK, se alcanza una distancia de 9 Km, bajo las condiciones del estándar, y una distancia de 11 Km bajo las condiciones de máxima BER permitida, sin embargo, es importante resaltar que para 12 Km, se obtiene una BER de $1,23 \times 10^{-3}$, lo cual en algunos casos podría garantizar un desempeño aceptable, aunque no alcanza a estar por debajo del umbral máximo, lo que hace que exista una penalidad de 1 Km entre las topología de 4 usuarios y de 8 usuarios. En cuanto al formato 16-QAM, se obtuvo los mismos valores de distancia alcanzada que la topología de 4 receptores, es decir, 11 y 12 Km, el primero bajo la condición del *Release 15*, y el segundo con la condición de BER de 10^{-3} , en general, se ve que para 16-QAM no afecta en gran medida la cantidad de usuarios finales que pueda llegar a tener la red. Por otra parte, en cuanto a 64-QAM se obtuvo el resultado que se venía presentando, es decir, 9 Km, lo cual indica que es el único formato, que presenta el mismo rendimiento, en cuanto a distancia máxima del enlace troncal para todas las configuraciones evaluadas. Por último, para 256-QAM, se ve un ligero desmejoramiento entre los resultados obtenidos para este caso y para el caso anterior, es decir, 4 usuarios finales, lo cual indica que no existe un desempeño aceptable ni para 1 Km de distancia del enlace troncal.

3.3 SISTEMA FTTH-GPON QUAD PLAY

En este escenario de prueba, se simula una red FTTH-GPON *Quad Play* al variar la cantidad de ONTs, la distancia del tramo de fibra y los formatos de modulación banda base asociados al servicio de Internet móvil; los demás parámetros configurables permanecen fijos.

Las métricas de evaluación del sistema deberían corresponder a las mismas utilizadas en los anteriores escenarios de prueba, sin embargo, hay un aspecto muy importante a considerar y corresponde a la diversa configurabilidad de simulación que existe entre los dos prototipos de red que se pretenden integrar, singularmente, OptSim permite configurar algunos parámetros de simulación cuando se simula mediante el modo muestra y con la técnica *Full VBS*, tales como: Tramo de tiempo simulado (en nanosegundos), ancho de banda de la simulación, *bitrate* de referencia, número de muestras por bit, entre los más importantes, lo que indica que cada una de las redes diseñadas fue simulada bajo unos determinados parámetros que condicionan el desempeño de las mismas; en particular, la simulación de la red *Triple Play* fue configurada con un ancho de banda de simulación de 60 nm, una *bitrate* de referencia de 0.8 Gbps y un tramo de tiempo simulado de 12 ns, mientras que la simulación de la red RoF fue configurada con un ancho de banda de simulación de 4nm, una *bitrate* de referencia de 0.8 Gbps y un tramo de tiempo simulado de 10000 ns (cuando se configura un tramo pequeño, menor a 2000 ns, la red RoF no presenta un buen desempeño), por lo tanto, al configurar la simulación de la red *Quad Play* se debe contemplar los requerimientos, a nivel de configurabilidad, de cada una de las redes, lo que puede implicar un cambio en las métricas de evaluación de alguno de los tres sistemas en cuestión (VoIP/IP, CATV Digital, Internet móvil), en particular, el sistema de CATV Digital, ya que, tal como se mencionó en la sección 3.1.2, se lograron medidas de BER, factor Q y Jitter, asociadas al diagrama del ojo de la señal en cuadratura, las cuales fueron tomadas como los valores reales del sistema, sin realmente serlos, aunque pudiéndose aproximar debido a que en ese caso la simulación operó con un *tramo de tiempo simulado* muy corto (12 ns), por ende, al simular la red FTTH-GPON *Quad Play* con el *tramo de tiempo simulado* que requiere el servicio de Internet móvil para un buen desempeño, es decir, mínimo 2000 ns, ya no es posible aproximar los valores que se obtengan del diagrama del ojo asociado a la señal, en fase o cuadratura, del servicio de CATV Digital a los valores reales del sistema [55], lo que indica que no es factible realizar medidas asociadas al diagrama del ojo de este servicio, pudiéndose tomar únicamente el diagrama de constelación.

Según lo anterior, los parámetros de evaluación del sistema FTTH-GPON *Quad Play* son los siguientes:

Tabla 3.16. Parámetros de evaluación del sistema FTTH-GPON *Quad Play*

<i>Servicio de Internet Móvil</i>	<i>Servicios VoIP/Datos</i>	<i>Servicio CATV Digital</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Tasa de error de bit • Potencia recibida • Magnitud del vector de error • Diagrama de constelación. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tasa de error de bit • Potencia recibida • Factor Q • Jitter • Diagrama del Ojo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Diagrama de Constelación.

En cuanto al servicio de Internet móvil, se sigue el mismo método de análisis aplicado a la red RoF, es decir, bajo la perspectiva del estándar móvil 5G donde se establecen umbrales mínimos de EVM para los diferentes esquemas M-QAM del canal PDSCH, como también, bajo la condición de máxima BER permitida para servicios de radiotelefonía celular (10^{-3}); la medida de la BER se estima de la misma manera que para el escenario de prueba anterior, es decir, relacionándola matemáticamente con el EVM (Véase Anexo C).

En la Figura 3.56 se ilustra la red *Quad Play*, caracterizada mediante OptSim, configurada mediante topología árbol para 1, 2, 4 y 8 ONTs.

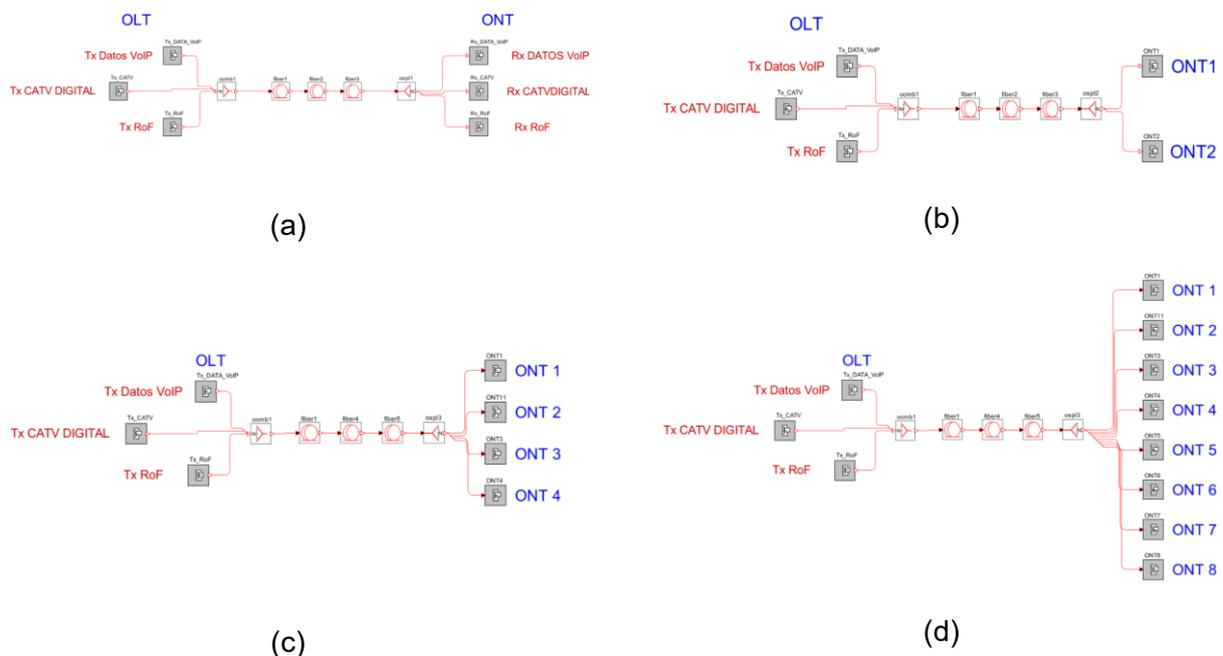


Figura 3.56 Red FTTH-GPON *Quad Play* con topología árbol. (a) 1 ONT (b) 2 ONTs (c) 4 ONTs (d) 8 ONTs

Cabe resaltar que en el modelo físico de red (Véase sección 2.3.3) se definieron todos los parámetros configurables excepto la longitud de onda de operación del módulo RoF, la cual debe corresponder a la utilizada en la red RoF independiente, es decir, 1553 nm.

Esta sección, se organiza de la siguiente manera: Primero se realiza una recopilación de las pruebas obtenidas para 1 ONT, en cuanto a gráficas de la señal de información y parámetros de evaluación del sistema, con su respectivo análisis; y por último, se exponen los resultados y análisis cuando se transmite hacia múltiples ONTs.

3.3.1 PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS PARA 1 ONT

Para el análisis de las gráficas de la señal, se propone una red con la misma distancia utilizada en los escenarios de simulación *CASO A* y *CASO B*, es decir, 5 Km, y además, se variará el esquema de modulación M-QAM para apreciar su comportamiento en el sistema.

En la Figura 3.56(a) se aprecia que el transmisor de la red *Quad Play* está compuesto por los transmisores de las redes de los *CASO A* y *CASO B*, por lo cual, la generación y

procesamiento de la información, asociada a cada servicio, corresponde los procesos ilustrados en sus respectivas secciones. Sin embargo, son de interés los espectros ópticos asociados a cada portafolio de servicio teniendo en cuenta que las señales deben ser embotelladas para ser transmitidas mediante una única fibra óptica, donde la señal de datos/VoIP se transmite en 201 THz, la señal de vídeo en 193.5 THz y la señal de Internet móvil en 193 THz, y al ser combinadas producen la señal *Quad Play*, tal como se indica a continuación:

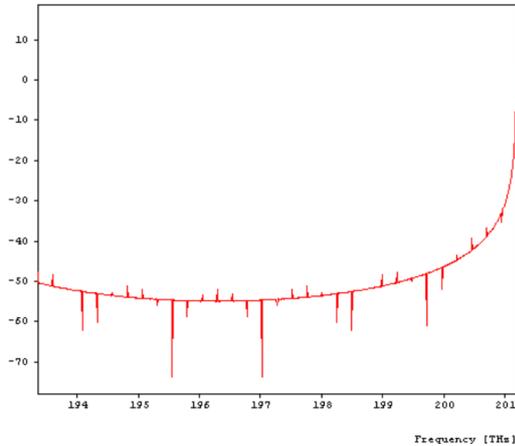


Figura 3.57. Espectro óptico del servicio de VoIP/datos.

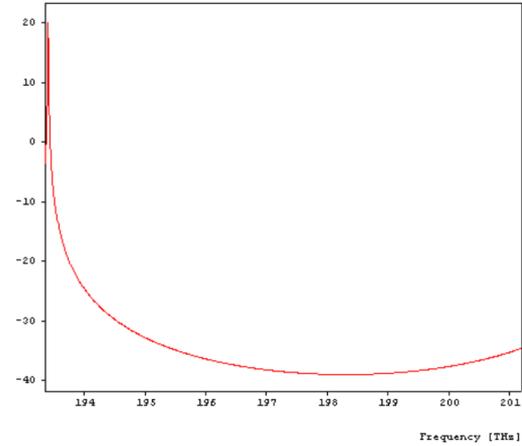


Figura 3.58. Espectro óptico del servicio de CATV Digital.

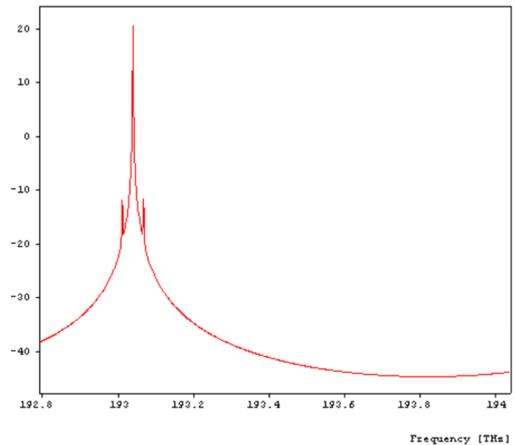


Figura 3.59. Espectro óptico del servicio de Internet móvil, cuando se modula en 16-QAM.

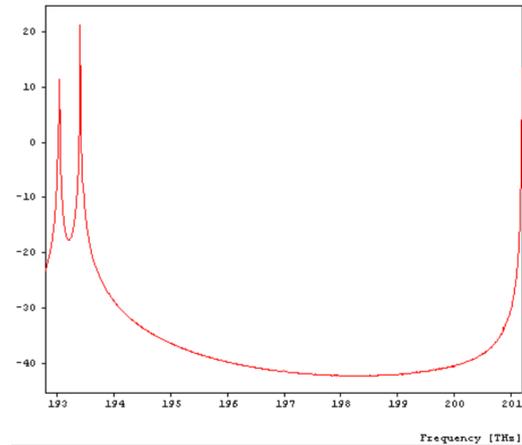


Figura 3.60. Espectro óptico de la señal *Quad Play*.

La señal *Quad Play* se transmite por medio de una fibra óptica *Corning-leaf* de 5 Km de longitud, luego ésta debe dividirse, mediante un *splitter* óptico, en tres réplicas para poder interpretar la información de las 3 longitudes de onda de operación, donde cada réplica se filtra para obtener el componente asociado a cada servicio. Los espectros ópticos de la señal *Quad Play* recibida y de las señales recuperadas se muestran en las siguientes ilustraciones:

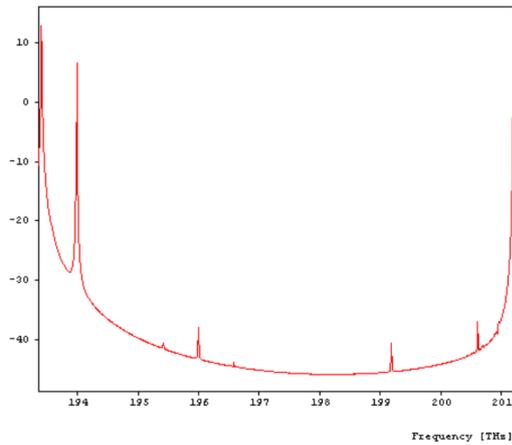


Figura 3.61 Espectro óptico de la señal *Quad Play* recibida.

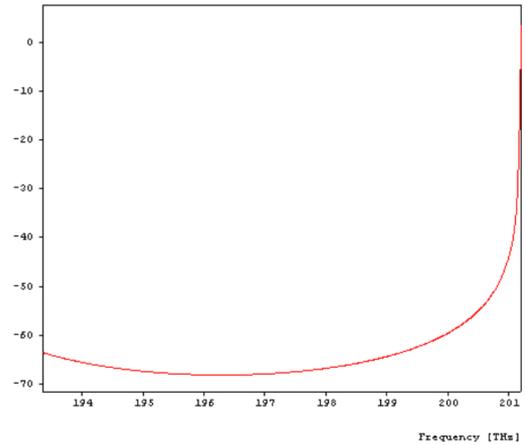


Figura 3.62. Espectro óptico de la señal de VoIP/datos recibida.

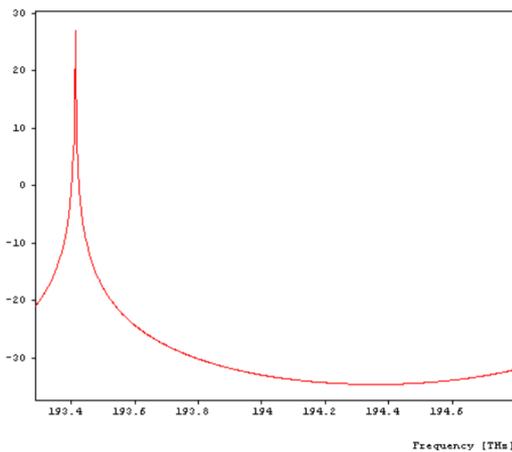


Figura 3.63 Espectro óptico de la señal de CATV Digital recibida.

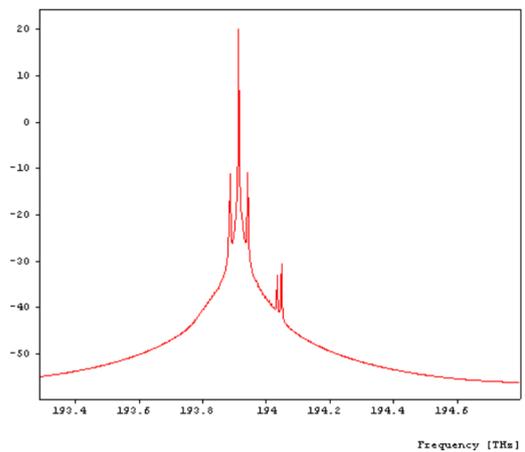


Figura 3.64 Espectro óptico de la señal RoF recibida.

Dentro de los espectros ópticos, se evidencia que la señal *Quad Play* recibida presenta varios lóbulos indeseados en diferentes valores de frecuencia, desde la ventana de los 1490 nm hasta los 1540, aproximadamente, lo cual obedece a una de las características principales del tipo de fibra óptica *Corning-leaf*, el cual presenta mejores condiciones de propagación que la fibra estándar SMF-28 en la ventana de los 1550 nm respecto a los efectos no lineales que introduce el canal óptico. Sin embargo, a pesar de dicho fenómeno ocasionado en las ventanas bajas, las portadoras ópticas asociadas a cada servicio se recuperan satisfactoriamente, por medio de una serie de filtros pasa banda tipo *Besse*; los procesos de recuperación de datos asociados a cada servicio son los mismos que los descritos en los anteriores escenarios de prueba.

En cuanto a los servicios *Triple Play*, el diagrama del ojo asociado a VoIP/datos y el diagrama de constelación asociado a CATV Digital, se muestran a continuación:

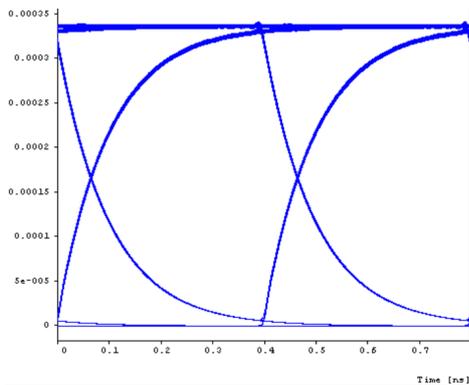


Figura 3.65 Diagrama del ojo obtenido de la señal de VoIP/datos.

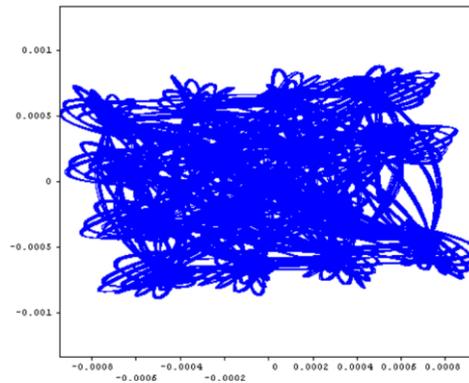


Figura 3.66 Diagrama de constelación obtenido de la señal de CATV Digital.

En los Figura 3.65 se aprecia que el diagrama del ojo de la señal de VoIP/datos se encuentra muy bien definido, presentándose un desempeño óptimo en términos de recuperación de los datos, con un valor de BER de 10^{-40} , un factor Q de 34 dB y un Jitter de 0.061 ns. En cuanto al diagrama de constelación (Véase Figura 3.66), debido a que la simulación fue configurada con un *tramo de tiempo simulado* muy alto, los analizadores de señal toman más muestras que las que fueron tomadas en la simulación de la red *Triple Play* independiente, lo cual produce que se superpongan una cantidad mucho más considerable de símbolos, y hace un poco imperceptible la ubicación y dispersión que tienen los símbolos interpretados en las 4 regiones de decisión de los 4 símbolos centrales de referencia, caso contrario a los 12 símbolos ubicados al exterior de la constelación, donde es evidente que existe una distribución uniforme en cada región de decisión; lo anterior, no implica que los símbolos centrales estén en una evidente situación de error, sino que al haber tantas muestras superpuestas no es visible su ubicación, pero cabe mencionar que por lo general las regiones de decisión asociadas a cada símbolo se comportan de forma muy similar entre ellas, sin llegar a tener una variación muy considerable de una a otra, por lo tanto, considerando que los símbolos exteriores están bien ubicados dentro de su región de decisión, se puede inferir que el diagrama de constelación se encuentra en buenas condiciones, y si se compara con el diagrama obtenido en la red *Triple Play* (Véase Figura 3.16) se puede apreciar una gran similitud en sus formas.

Por otro lado, para el servicio de Internet móvil, los diagramas de constelación obtenidos para cada formato de modulación empleado se presentan en la siguiente figura:

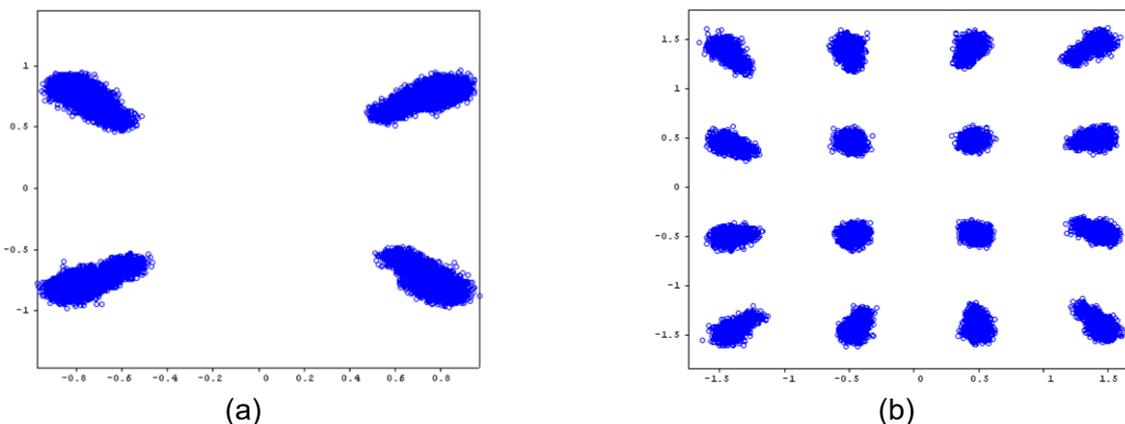
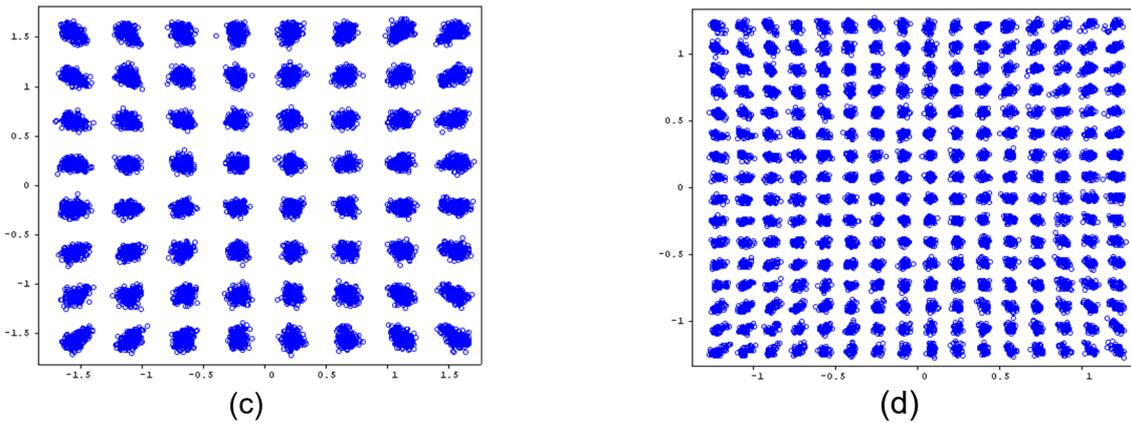


Figura 3.67. Diagrama de constelación obtenido de la señal RoF. (a) QPSK (b) 16-QAM.



Continuación. Figura 3.67. Diagrama de constelación obtenido de la señal RoF. (c) 64-QAM (d) 256-QAM.

A partir de la Figura 3.67, se aprecia que los diagramas de constelación obtenidos presentan características muy similares a los diagramas de constelación obtenidos en la red RoF independiente, donde los formatos QPSK, 16-QAM y 64-QAM dan evidencia de una correcta recuperación de la información, mientras que en el esquema 256-QAM, a pesar de no haber un gran margen de error en comparación a los otros formatos, existe la posibilidad que varios punto aislados se agrupen en regiones de decisión que no corresponden, debido a la distancia tan pequeña que hay entre los 256 símbolos del alfabeto.

Los valores de EVM obtenidos por cada nivel de modulación se listan en la Tabla 3.17, donde se evidencia que para una distancia de 5 Km el servicio de Internet móvil presenta un buen desempeño para formatos QPSK, 16-QAM y 64-QAM, mientras que para 256-QAM el EVM se encuentra 2.6% por encima del mínimo requerido.

Tabla 3.17. Resultados de EVM vs formato de modulación, para el servicio de Internet móvil a 5 Km de distancia.

Formato de Modulación	QPSK	16-QAM	64-QAM	256-QAM
EVM [%]	16,45 %	9,33 %	5,19 %	6,1 %

Con base en lo anterior, se establece que para los esquemas de modulación QPSK, 16-QAM y 64-QAM las distancias pertinentes de evaluación son a partir de 5 Km, a escala de 1 Km, hasta encontrar los puntos de condición mínima, mientras que para 256-QAM, así como en el caso de la red RoF independiente, se buscará la distancia máxima permitida para distancias menores a 5 Km.

En la Tabla 3.18 se presentan los resultados obtenidos en la red FTTH-GPON *Quad Play*, en términos de EVM, BER, factor Q y Jitter.

Tabla 3.18. Resultados obtenidos respecto a los parámetros de evaluación del sistema, para una distancia variable.

d [Km]	Internet Móvil								VoIP/datos		
	QPSK		16-QAM		64-QAM		256-QAM		BER	Jitter	Q [dB]
	EVM	BER	EVM	BER	EVM	BER	EVM	BER			
1	----	----	----	----	----	----	4,67	0,076	10^{-40}	0,034	33,93
2	----	----	----	----	----	----	4,9	0,101	10^{-40}	0,041	33,75
3	----	----	----	----	----	----	6,29	0,317	10^{-40}	0,035	33,64
4	----	----	----	----	----	----	7,07	0,469	10^{-40}	0,057	32,68
5	16,45	$3,46 \times 10^{-7}$	9,23	$4,74 \times 10^{-7}$	5,19	$7,62 \times 10^{-6}$	7,2	0,495	10^{-40}	0,071	33,55
6	16,30	$2,73 \times 10^{-7}$	9,05	$2,90 \times 10^{-7}$	5,52	$2,24 \times 10^{-5}$	----	----	10^{-40}	0,068	33,43
7	16,19	$2,28 \times 10^{-7}$	9,28	$5,41 \times 10^{-7}$	5,99	$7,85 \times 10^{-5}$	----	----	10^{-40}	0,054	33,18
8	17,29	$1,16 \times 10^{-6}$	9,41	$7,53 \times 10^{-7}$	6,33	$1,65 \times 10^{-4}$	----	----	10^{-40}	0,066	33,22
9	19,83	$1,91 \times 10^{-5}$	10,00	$2,90 \times 10^{-6}$	6,71	$3,34 \times 10^{-4}$	----	----	10^{-40}	0,063	33,15
10	20,97	$4,93 \times 10^{-4}$	12,49	$1,28 \times 10^{-4}$	7,47	<u>$1,0 \times 10^{-3}$</u>	----	----	10^{-40}	0,059	32,93
11	21,73	$8,58 \times 10^{-4}$	13,22	<u>$2,69 \times 10^{-4}$</u>	9,12	$4,87 \times 10^{-2}$	----	----	10^{-40}	0,072	32,99
12	24,36	<u>$4,01 \times 10^{-4}$</u>	15,09	$1,14 \times 10^{-3}$	11,02	$1,39 \times 10^{-2}$	----	----	10^{-40}	0,071	32,85
13	33,12	$6,84 \times 10^{-3}$	21,41	$1,37 \times 10^{-3}$	----	----	----	----	10^{-40}	0,063	33,01
14	40,71	$2,4 \times 10^{-2}$	----	----	----	----	----	----	10^{-40}	0,065	32,94

En la Tabla 3.18, se evidencia que el servicio de VoIP/datos siempre presenta un desempeño óptimo, para las distancias evaluadas, con un valor de BER de 10^{-40} y con niveles de Jitter muy pequeños, que varían entre 0,95 ns y 1,68 ns, lo cual indica que la coexistencia de los servicios *Quad Play* no afecta en mayor medida al servicio de VoIP/Datos

En cuanto al desempeño del servicio de Internet móvil, se tienen dos puntos diferentes de evaluación: En primer lugar, en cuanto al parámetro EVM, se observa que los formatos 16-

QAM y 64-QAM son los que permiten alcanzar tramos de longitud de fibra más extensos, de máximo 10 Km, mientras que QPSK garantiza un buen desempeño hasta un enlace óptico de 8 Km, y 256-QAM no presenta buenos resultados ni para 1 Km. En segundo lugar, si se evalúan los resultados respecto a una BER máxima permitida de 10^{-3} , el esquema que mejor rendimiento presenta, en este caso es QPSK, donde se garantizan hasta 12 Km de longitud del enlace, mientras que en 16-QAM es posible alcanzar máximo 11 Km, y respecto a 64-QAM, se brinda un buen desempeño hasta 10 Km, tal como en el caso de EVM. En las siguientes figuras se muestra el comportamiento gráfico de ambos parámetros en relación a la longitud del enlace.

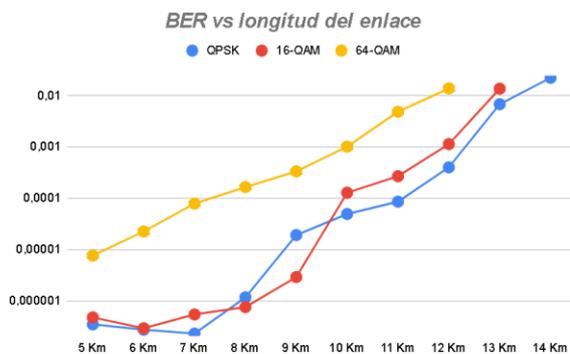


Figura 3.68. Resultados de BER vs longitud del enlace, Internet móvil

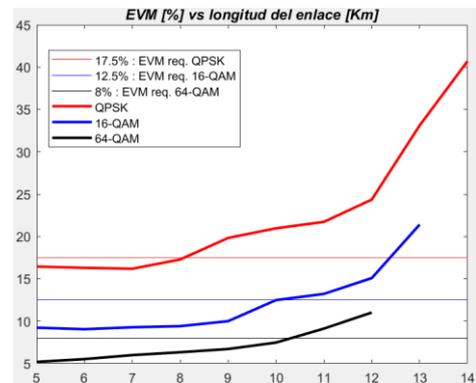


Figura 3.69 Resultados de EVM vs longitud del enlace, Internet móvil

Al comparar los valores de distancia obtenidos en la Figura 3.68 y en la Figura 3.69, se evidencia que si se estudia el sistema en relación a la BER y se establece un límite máximo de 10^{-3} , se puede alcanzar una mayor distancia a la alcanzada cuando se condiciona el sistema a los valores mínimos de EVM que estipula el estándar 5G, exceptuando 64-QAM donde la distancia alcanzada se mantiene igual, y sin tomar en cuenta el formato 256-QAM ya que bajo ninguna perspectiva alcanza resultados aceptables. A continuación, se presentan los diagramas de constelación obtenidos para el caso más crítico en términos de BER vs longitud de enlace, para cada formato de modulación empleado.

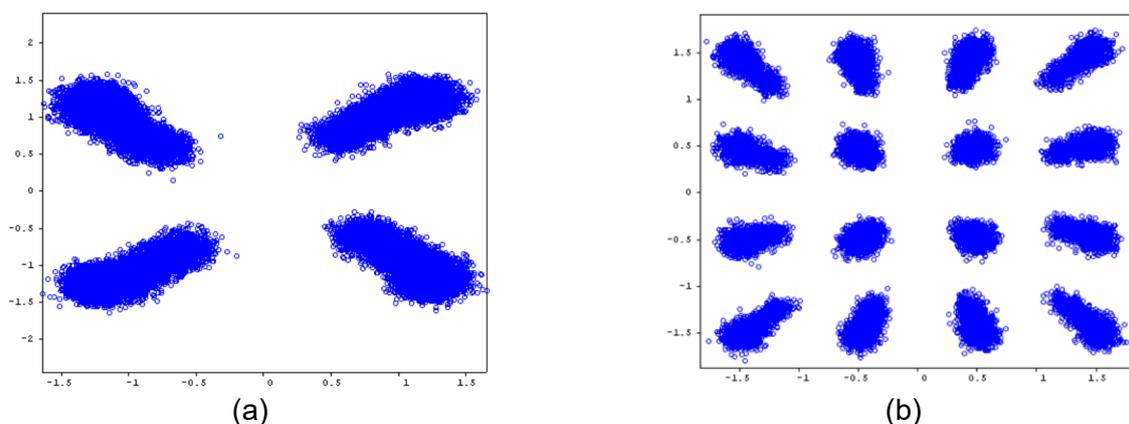
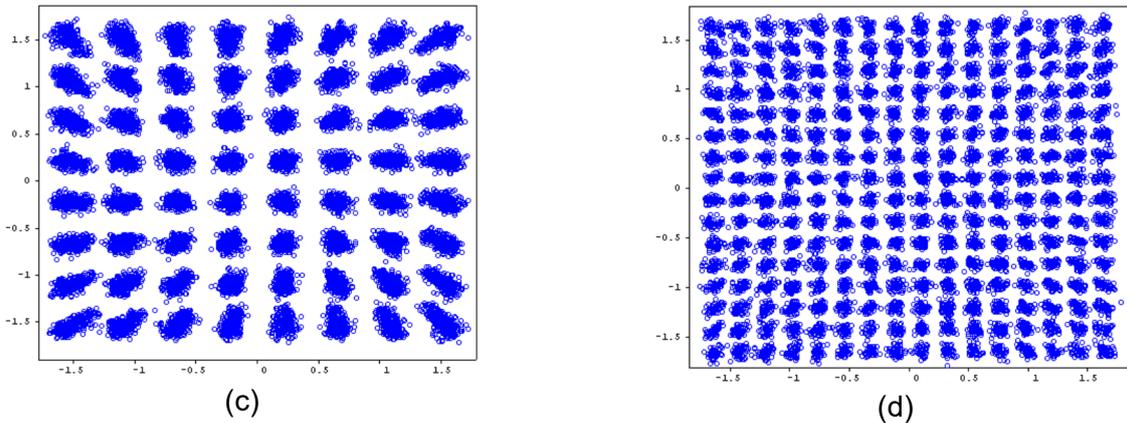


Figura 3.70. Diagramas de constelación de la señal RoF, para el caso más crítico. (a) QPSK, a 12 Km. (b) 16-QAM, a 11 Km.



Continuación. Figura 3.70 Diagramas de constelación de la señal RoF, para el caso más crítico. (c) 64-QAM, a 10 Km (d) 256-QAM, a 1 Km.

En la Figura 3.70, se aprecia que existe una correcta recuperación de los datos para los puntos críticos evaluados bajo la perspectiva de una BER permitida de 10^{-3} , al emplear los formatos de modulación QPSK, 16-QAM y 64-QAM.

En conclusión, el servicio de Internet móvil presenta un buen desempeño, en términos generales, en relación a los parámetros EVM y BER, sin embargo, al comparar su desempeño con el alcanzado por la red RoF independiente, se evidencian diversos comportamientos que se describen a continuación:

En primer lugar, si se analiza los resultados obtenidos en comparación a los valores umbrales de EVM requeridos que estipula el estándar móvil 5G, se evidencia que para los esquemas QPSK y 16-QAM se alcanzan menores distancias del tramo troncal de fibra; en específico, para QPSK se tuvo un alcance máximo de 10 Km en la red RoF, mientras que en la red *Quad Play* se obtuvo un buen rendimiento hasta una distancia máxima de 8 Km, así mismo, para 16-QAM se alcanzó una distancia de 11 Km en la red RoF independiente, mientras que se alcanzó 10 Km en la red integrada. Ahora bien, en cuanto al esquema 64-QAM, la integración de las redes produce una mejora en términos de distancia máxima alcanzada, en la red *Quad Play* se alcanzan 9 Km, 1 Km más de lo obtenido en la red RoF de Internet móvil. Por parte del formato de modulación 256-QAM, no se obtienen buenos resultados para ningún valor de distancia evaluada, sin embargo, se presenta una leve pero intrascendente mejora cuando se transmite conjunto a los servicios *Triple Play*.

En segundo lugar, si se analiza los resultados obtenidos en comparación al umbral máximo permitido de BER (10^{-3}), es pertinente afirmar que existe un comportamiento diferente para cada formato de modulación asociado entre los que presentaron buen rendimiento, en particular, para QPSK, se logró la misma distancia tanto en la red independiente como en la red *Quad Play*, caso contrario a 16-QAM donde se produjo una desmejora al integrar las redes que ocasionó una penalidad de 2 Km entre los recorridos máximos alcanzados entre ambos casos de estudio, y caso contrario a 64-QAM, donde hubo un mejor desempeño en el sistema *Quad Play* logrando alcanzar 9 Km de alcance, en comparación de los 8 Km cubiertos por la red RoF. Ahora bien, para el formato 256-QAM, tal como en el caso anterior, se presenta una leve mejora cuando se transmiten los servicios *Quad Play*, aunque sin llegar a ser lo suficientemente significativa como para garantizar un desempeño mínimo.

3.3.2 PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS PARA VARIAS ONTs

En este segmento se exponen los resultados obtenidos al simular el sistema FTTH-GPON *Quad Play* configurado para varias ONTs (2, 4 y 8 usuarios finales).

Es importante mencionar, que los servicios de VoIP/datos, presentaron muy buen desempeño en cada uno de los casos de estudio, sin importar la cantidad de ONTs, ni la distancia máxima evaluada (14 Km), lo cual evidencia que no existe un gran impacto de la integración en relación a este servicio en particular. Por otro lado, en cuanto al servicio de CATV Digital, debido a que dentro de la herramienta OptSim no existen componentes de medida que estimen su desempeño físico en términos de parámetros comunes como BER, Jitter y factor Q, no es posible determinar en un concepto exacto respecto a si el servicio se ve afectado por la coexistencia *Quad Play*, sin embargo, vale la pena mencionar que en el estudio [11], se hicieron pruebas de una red muy similar a la desarrollada en este escenario de prueba, donde se presentó un buen desempeño del servicio de CATV Digital hasta 6 Km de distancia, con una BER de aproximadamente 10^{-10} , además, en los estudios realizados en [22, 50] se estableció que para este sistema de CATV Digital, existe un buen desempeño para distancias mucho mayores a 20 Km, lo cual indica, que en este caso, a pesar de no tener medidas exactas, se puede inferir a partir de los antecedentes investigativos, que hasta 15 Km se podría presentar un buen en el servicio de CATV Digital.

Ahora bien, en el caso de Internet móvil, se observa que para los formatos QPSK y 16-QAM se encontraron dos valores de distancia soportada, uno que cumple las condiciones mínimas del estándar 5G, y otro que corresponde al punto máximo donde no se supera el límite de BER de 10^{-3} , mientras que para el esquema 64-QAM la distancia alcanzada bajo ambas perspectivas fue la misma, y para el esquema 256-QAM no se encontró ningún punto que satisfaga alguna de las condiciones mínimas estipuladas; lo anterior, tanto para 2, 4 y 8 ONTs.

Para el caso de 2 ONTs, las tablas con todos los resultados obtenidos por cada parámetro de evaluación (medible) se encuentran en el Anexo E. A continuación, se presenta la Tabla 3.19 con los resultados obtenidos para la ONT que presente el rendimiento más crítico en relación a la distancia máxima alcanzada.

Tabla 3.19 Resultados para la ONT 1, en un arreglo de 2 usuarios.

<i>Servicio de Internet móvil</i>									
<i>d [Km]</i>	QPSK		16-QAM		64-QAM		256-QAM		<i>P_{RX} [dBm]</i>
	<i>EVM</i>	<i>BER</i>	<i>EVM</i>	<i>BER</i>	<i>EVM</i>	<i>BER</i>	<i>EVM</i>	<i>BER</i>	
1	-----	-----	-----	-----	-----	-----	3,19	0,002	-6,44
8	17,27	$1,10 \times 10^{-6}$	11,24	$2,6 \times 10^{-5}$	6,67	$3,13 \times 10^{-4}$	-----	-----	-8,01
9	20,33	$2,93 \times 10^{-5}$	12,04	$7,64 \times 10^{-5}$	7,34	$8,59 \times 10^{-4}$	-----	-----	-8,12
12	24,68	<u>$4,68 \times 10^{-4}$</u>	15,27	$1,3 \times 10^{-3}$	12,15	$2,09 \times 10^{-2}$	-----	-----	-8,55

Servicio de VoIP/Datos			
d [Km]	P_{RX} [dBm]	BER	Jitter [ns]
0 - 15	-19,33 – -18,88	10^{-40}	0,061 - 0,069

Los diagramas de constelación asociados a cada punto crítico (distancia máxima alcanzada) se ilustran en la Figura 3.71 y en la Figura 3.72, considerando únicamente la ONT que presente un menor rendimiento en términos de EVM y BER.

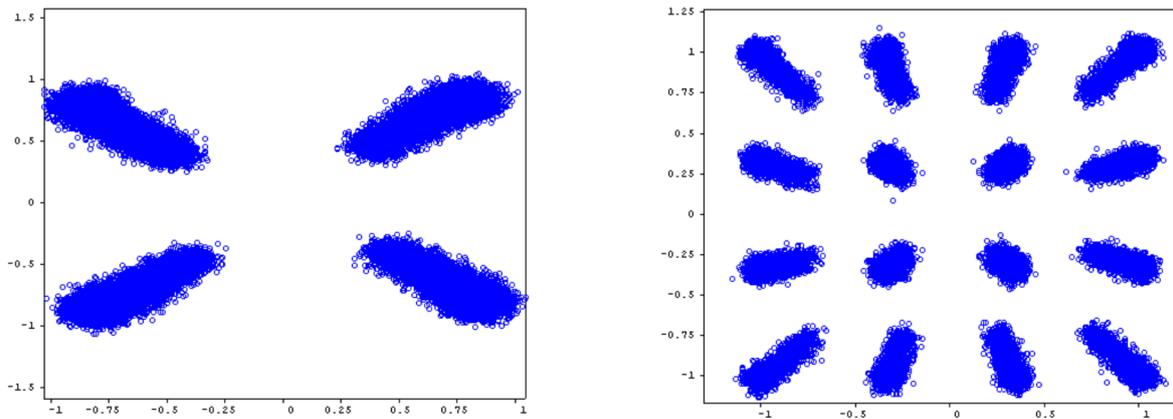


Figura 3.71. (a) Diagrama de constelación QPSK en la ONT1 a 12 Km (b) Diagrama de constelación 16QAM en la ONT1 a 11 Km

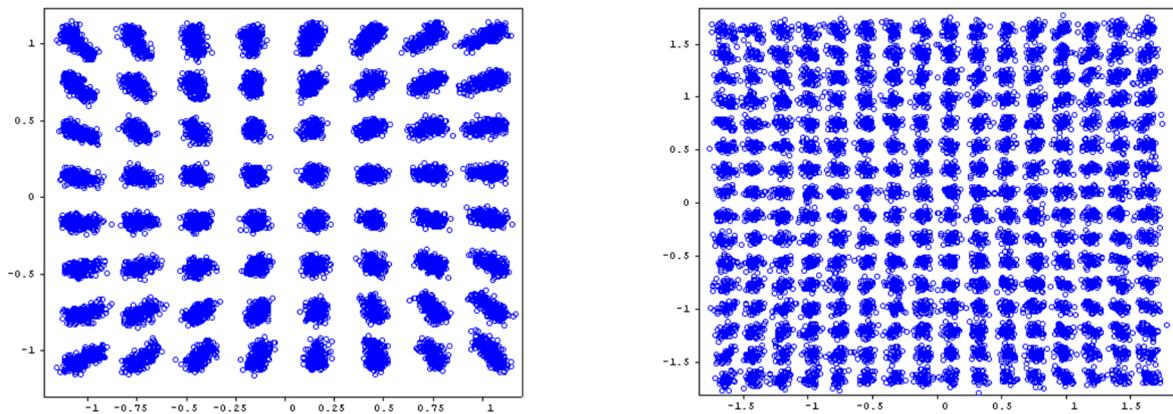


Figura 3.72. (a) Diagrama de constelación 64-QAM a 9 Km para la ONT 2. (b) Diagrama de constelación 256-QAM obtenido a 1 Km para la ONT 1.

Para este arreglo de 2 usuarios finales, se presenta un menor desempeño en términos de BER o EVM que el logrado cuando se configura con una ONT, bajo todos los formatos de modulación estudiados.

Empleando QPSK se alcanza una distancia de 8 Km si se analiza el sistema bajo las condiciones del *Release 15*, y una distancia de 12 Km si se compara el valor de BER obtenido con el máximo aceptado, semejante al caso de 1 ONT donde el sistema presenta un muy buen rendimiento hasta 8 Km y 12 Km, respectivamente. Para el caso de 16-QAM, los

resultados obtenidos indican que se cumple con las condiciones del estándar hasta 9 Km de longitud, y se cumplen las condiciones mínimas de BER para 11 Km de longitud del tramo de fibra troncal, y si se comparan con los resultados obtenidos para 1 ONT, en cuanto a las condiciones 5G la longitud del enlace es 1 Km menor en el arreglo de 2 ONTs, mientras que en términos de BER, se alcanza la misma distancia en ambos arreglos. Ahora bien, para el caso de 64-QAM se presenta una situación diferente a los casos anteriores, debido a que se alcanza una distancia máxima de 9 km bajo cualquier condición, siendo un valor 1 Km menor que el resultado obtenido para 1 ONT, lo cual indica que, en términos comparativos, no existe una grave descompensación de distancia si se transmite a 1 ó 2 usuarios. Por último, para el formato de modulación 256-QAM, tal como sucedió para 1 ONT, la mejor situación se presentó a 1 Km de distancia, aunque si bien el rendimiento fue insuficiente.

Para el caso de 4 usuarios finales, las tablas con todos los resultados obtenidos por cada parámetro de evaluación (medible) se encuentran en el Anexo E. A continuación, se presenta la Tabla 3.20 con los resultados obtenidos para la ONT que presente el rendimiento más crítico en relación a la distancia máxima alcanzada.

Tabla 3.20. Resultados para la ONT 3, en un arreglo de 4 usuarios.

Servicio de Internet móvil									
<i>d</i>	QPSK		16-QAM		64-QAM		256-QAM		<i>P_{RX}</i> [dBm]
	<i>EVM</i>	<i>BER</i>	<i>EVM</i>	<i>BER</i>	<i>EVM</i>	<i>BER</i>	<i>EVM</i>	<i>BER</i>	
1	-----	-----	-----	-----	-----	-----	3,95	0,023	-6,34
8	17,16	$9,77 \times 10^{-7}$	10,24	$4,75 \times 10^{-6}$	6,07	$9,52 \times 10^{-5}$	-----	-----	-8,11
9	19,87	$1,92 \times 10^{-5}$	12,72	$1,6 \times 10^{-5}$	7,20	$1,42 \times 10^{-4}$	-----	-----	-8,22
12	24,68	$4,69 \times 10^{-4}$	15,93	$1,9 \times 10^{-3}$	13,68	$3,22 \times 10^{-2}$	-----	-----	-8,58
Servicio de VoIP/Datos									
<i>d</i> [Km]	<i>P_{RX}</i> [dBm]		<i>BER</i>		<i>Jitter</i> [ns]				
0 - 15	-19,33 – -18,88		10^{-40}		0,062 – 0,073				

Los diagramas de constelación asociados a cada punto crítico (distancia máxima alcanzada) se ilustran en la Figura 3.73 y en la Figura 3.74, considerando únicamente la ONT que presente un menor desempeño en términos de EVM y BER, entre las 4 ONTs existentes.

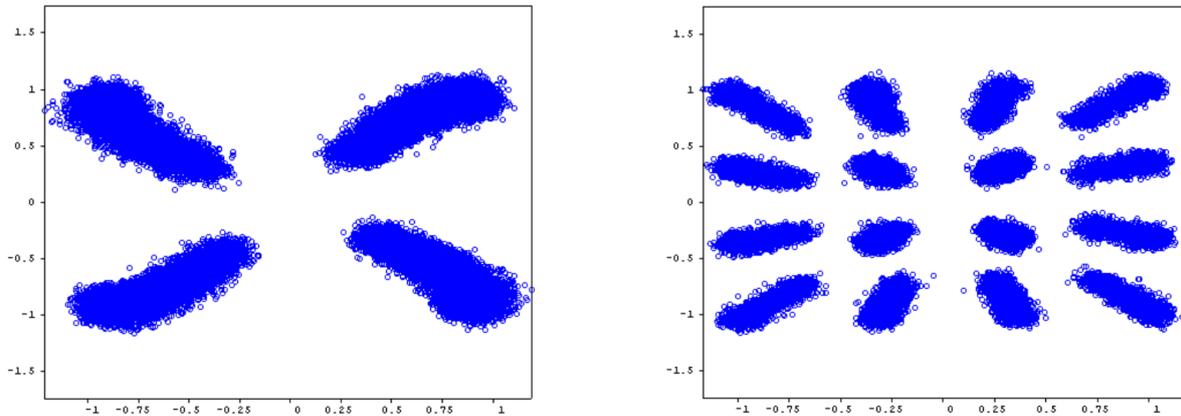


Figura 3.73. (a) Diagrama de constelación QPSK en la ONT1 a 12 Km (b) Diagrama de constelación 16-QAM en la ONT3 a 11 Km.

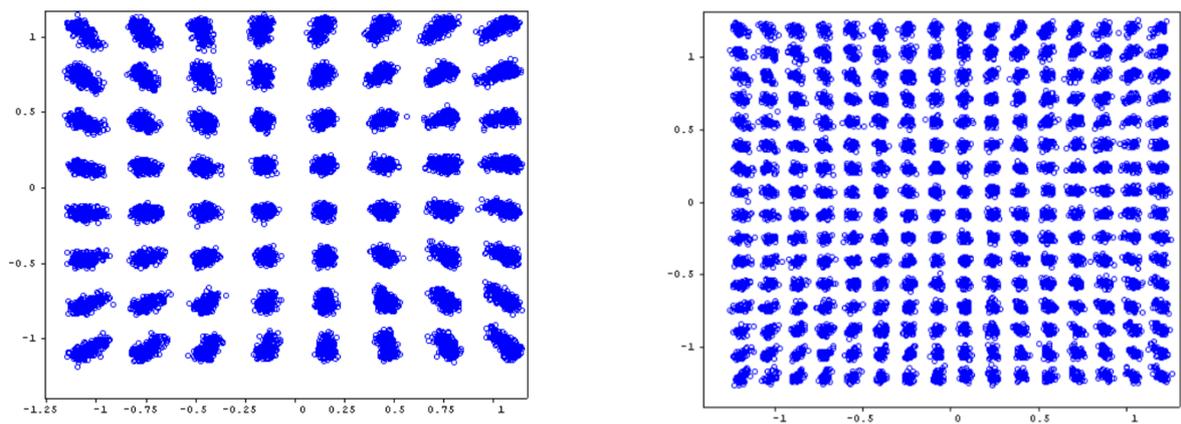


Figura 3.74. (a) Diagrama de constelación 64-QAM en la ONT3 a 11 Km (b) Diagrama de constelación 256-QAM en la ONT1 a 1 Km.

En el arreglo de 4 usuarios, se aprecia un comportamiento muy similar al presentado para 2 ONTs; en términos generales, se mantiene el mismo comportamiento para QPSK, donde se obtuvo los mismos valores de distancia, es decir, 8 y 12 Km, el primero respecto al estándar, y el segundo relacionado con la BER máxima permitida, en cuanto al formato 16-QAM también se obtuvo los mismos valores máximos de distancia del tramo de fibra troncal que los obtenidos en el arreglo de 2 ONTs, y para el caso de 64-QAM, se obtuvo una única medida de distancia alcanzada, bajo las dos perspectivas en consideración, de 9 Km, la cual fue la misma a la alcanzada para 2 ONTs, y por último, en 256-QAM nuevamente se presentó un desempeño físico insuficiente en términos de los parámetros en cuestión, para los valores de distancia evaluada, siendo los resultados obtenidos muy similares a los obtenidos tanto para 2 ONTs como para 1 ONT.

Para el caso de 8 usuarios finales, las tablas con los resultados obtenidos por cada parámetro de evaluación (medible) se encuentran en el Anexo E. A continuación, se presenta la Tabla 3.21 con los resultados obtenidos para la ONT que presente el rendimiento más crítico en relación a la distancia máxima alcanzada.

Tabla 3.21 Resultados para la ONT 8, en un arreglo de 8 usuarios.

Servicio de Internet móvil										
<i>d</i>	QPSK		16-QAM		64-QAM		256-QAM		P_{RX} [dBm]	
	<i>EVM</i>	<i>BER</i>	<i>EVM</i>	<i>BER</i>	<i>EVM</i>	<i>BER</i>	<i>EVM</i>	<i>BER</i>		
1	-----	-----	-----	-----	-----	-----	4,14	0,033	-6,50	
8	17,45	$1,44 \times 10^{-6}$	9,99	$2,79 \times 10^{-6}$	6,31	$1,5 \times 10^{-4}$	-----	-----	-8,08	
9	19,17	$1,03 \times 10^{-6}$	11,26	$2,71 \times 10^{-5}$	7,02	$5,5 \times 10^{-4}$	-----	-----	-8,24	
11	26,33	$9,6 \times 10^{-4}$	13,74	$4,2 \times 10^{-4}$	11,32	$1,6 \times 10^{-2}$	-----	-----	-8,61	
Servicios Triple Play										
<i>d</i> [Km]	P_{RX} [dBm]		<i>BER</i>				<i>Jitter</i> [ns]			
0 - 15	-19,33 – -18,88		10^{-40}				0,051 – 0,062			

Los diagramas de constelación para cada punto crítico se muestran en la Figura 3.75 y Figura 3.76, considerando sólo la ONT que menor rendimiento presente en términos de EVM y BER.

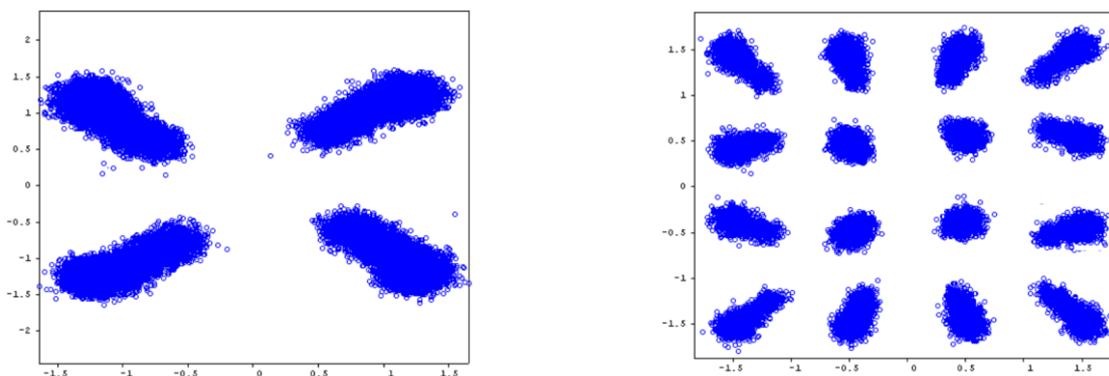


Figura 3.75. (a) Diagrama de constelación QPSK en la ONT8 a 11 Km. (b) Diagrama de constelación 16-QAM en la ONT5 a 11 Km.

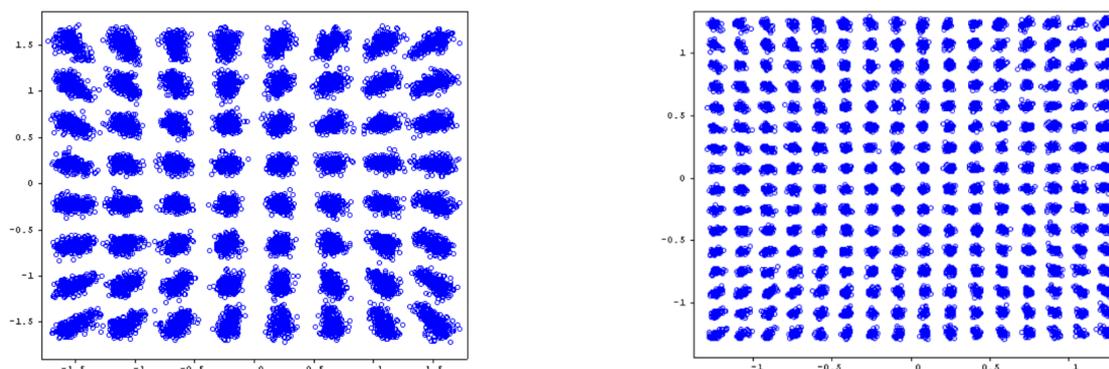


Figura 3.76. (a) Diagrama de constelación 64-QAM en la ONT8 a 9 Km. (b) Diagrama de constelación 256-QAM en la ONT3 a 1 Km.

En el arreglo de 8 ONTs sólo existe una variabilidad respecto al arreglo de 4 ONTs, en términos de distancia máxima alcanzada, en el formato QPSK donde se alcanzó una distancia de 8 Km en términos de EVM requerido, y una distancia de 11 Km en términos de BER máxima permitida, es decir, 1 Km menor que la obtenida para 4 ONTs. Para los demás formatos de modulación las distancias alcanzadas fueron las mismas que para el anterior arreglo, en particular, para 16-QAM se logra cubrir un tramo de fibra troncal de 10 Km, si se considera el *Release*, y 11 Km si se considera una BER máxima permitida de 10^{-3} , mientras que para 64-QAM, se alcanza 9 Km bajo ambas consideraciones, y finalmente, para el caso de 256-QAM, éste mantiene el mismo comportamiento que el observado en los arreglos de 1 ONT, 2 ONTs y 4 ONTs.

En general, se pudo evidenciar que la coexistencia de los servicios *Quad Play*, influye negativamente en el servicio de Internet móvil cuando se transmite bajo los esquemas QPSK y 16-QAM, sin llegar a ser una condicionante importante en el despliegue del sistema, puesto que produce una penalidad máxima de 2 Km de longitud del enlace troncal, en el peor de los casos. Por otra parte, al emplear el formato de modulación 64-QAM, existe una mejora en el Internet móvil cuando la red transmite servicios *Quad Play*, debido a que se alcanza una distancia 1 Km mayor de la alcanzada cuando se transmite el servicio por su red de acceso independiente (red RoF); por último, considerando 256-QAM nunca hubo un punto mínimo de longitud del tramo troncal donde se garantizara un buen desempeño en términos de BER o EVM. Por otro lado, en el caso de la cantidad de usuarios finales, se evidenció que para los casos de estudio evaluados, no hubo una mayor penalidad en comparación a la red para 1 ONT, siendo un valor máximo de 1 Km, para el peor de los casos.

Además de lo anterior, es pertinente afirmar que para los servicios de VoIP/datos, la coexistencia de servicios *Quad Play* no influyó negativamente en su desempeño en términos de BER, presentándose un valor óptimo de 10^{-40} en todas las configuraciones evaluadas para múltiples usuarios finales, resultados coherentes si se considera las investigaciones [22, 50] donde se establece que se puede brindar el servicio en muy buenas condiciones para distancias mucho mayores a 20 Km. Finalmente, en cuanto al servicio de CATV Digital, al no poder medir con exactitud ningún parámetro asociado al diagrama del ojo, la única métrica medible corresponde a la potencia de recepción, donde según las tablas anteriores, no existe un mayor impacto de los efectos lineales (atenuación) en la propagación.

3.4 SÍNTESIS DE RESULTADOS

En esta sección se presenta una síntesis de los resultados obtenidos en relación a las métricas de evaluación del sistema, en cada uno de los escenarios de prueba simulados. En primer lugar, para la red de servicios *Triple Play*, se exponen los resultados más relevantes asociados a cada servicio antes y después de integrar la red de servicios *Quad Play*. Por último, para la red RoF de servicios móviles, se expone el impacto a nivel físico que tuvo la técnica de modulación digital M-QAM, medido en niveles porcentuales de EVM, en un módulo RoF, antes y después de conformar la red de servicios *Quad Play*.

3.4.1 SERVICIOS TRIPLE PLAY

Para el servicio de datos, al ser un sistema basado en codificación de línea los parámetros de evaluación más relevantes son: BER, factor Q, Jitter y diagrama del ojo.

Los resultados que se obtuvieron a una distancia de 5 Km de distancia se presentan en la Tabla 3.22, para las configuraciones simuladas, es decir, arreglos de 1 ONT y 8 ONTs; para el caso de 8 usuarios se muestran los resultados obtenidos en la ONT que peor rendimiento físico presentó. Cabe resaltar que el servicio de datos dentro de la red FTTH-GPON *Triple Play* se transmitió sobre fibra óptica tipo SMF-28, mientras que dentro de la red FTTH-GPON *Quad Play* se transmitió sobre fibra óptica tipo *Corning-Leaf*.

Tabla 3.22. Síntesis de resultados del servicio de datos, a 5 Km de distancia.

d = 5 Km		Red FTTH-GPON <i>Triple Play</i> .			Red FTTH-GPON <i>Quad Play</i>			
Usuarios	ONT	BER	Factor Q	Jitter	ONT	BER	Factor Q	Jitter
1	ONT 1	10^{-40}	34.2 dB	0.06 ns	ONT 1	10^{-40}	34 dB	0.061 ns
8	ONT 4	10^{-40}	32.5 dB	0.066 ns	ONT 3	10^{-40}	31.5 dB	0.071 ns

Teniendo en cuenta que la red FTTH-GPON *Triple Play* se evaluó sólo para distancias de 5 y 20 Km, y que la distancia máxima simulada en la red FTTH-GPON *Quad Play* fue de 14 Km, en la Tabla 3.23 se comparan los valores más críticos obtenidos en ambos sistemas, tanto para 1 ONT como para 8 ONTs (la ONT más crítica).

Tabla 3.23. Síntesis del servicio de datos, para el valor de distancia más crítico.

	d=20Km	Red FTTH-GPON <i>Triple Play</i> .			d=14Km	Red FTTH-GPON <i>Quad Play</i>		
Usuarios	ONT	BER	Factor Q	Jitter	ONT	BER	Factor Q	Jitter
1	ONT 1	10^{-40}	33.33 dB	0.06 ns	ONT 1	10^{-40}	32,94 dB	0.065 ns
8	ONT 6	10^{-40}	33.32 dB	0.075 ns	ONT 6	10^{-40}	32.29 dB	0.071 ns

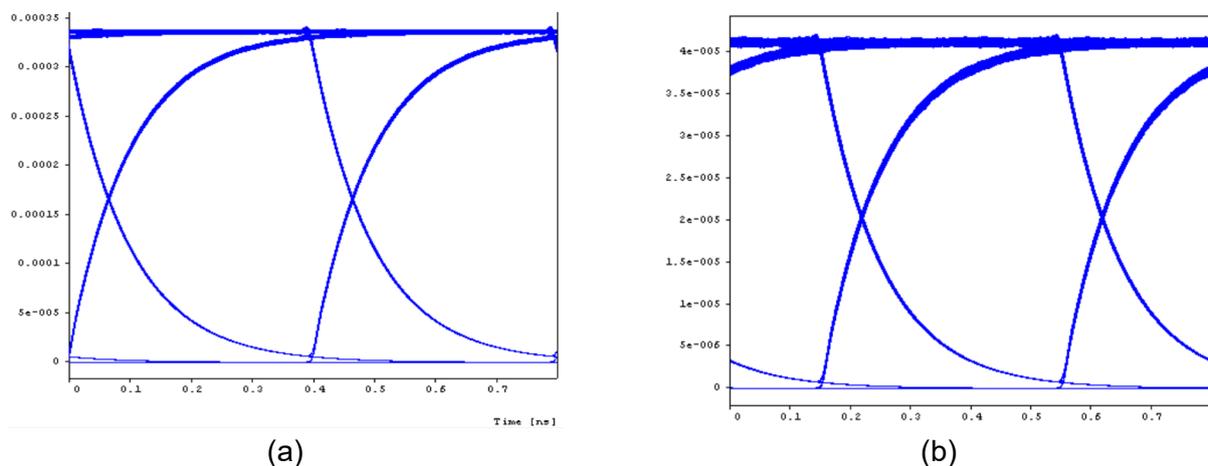


Figura 3.77. Diagrama del ojo obtenido de la señal de datos para 1 ONT a 5 Km de distancia. (a) Red FTTH-GPON *Triple Play* (b) Red FTTH-GPON *Quad Play*

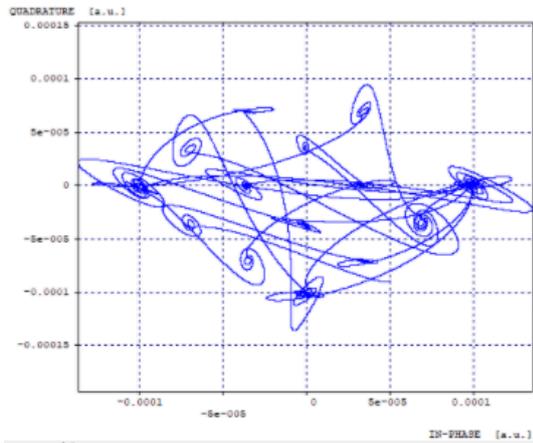
En la Figura 3.77 se ilustran los diagramas de ojo obtenidos en una configuración de 1 ONT a 5 Km de distancia, antes y después de la integración de la red de servicios *Quad Play*; se escoge este valor de distancia debido a que es el único valor bajo la cual se simulan ambas redes. En resumen, los resultados obtenidos expresan que, para el servicio de datos y *VoIP*, la integración de la red *Quad Play* no induce negativamente en el desempeño físico, debido

a que se conservan valores óptimos de BER, es decir, del orden de 10^{-40} , para cualquier configuración de usuarios y distancias evaluadas, y se presentan valores de Jitter dentro de un rango de 0.06 y 0.08 ns en los diferentes casos de estudio simulados. De igual forma, los diagramas de ojo obtenidos permiten observar que en ambos casos la recuperación de información es óptima, aunque si bien se diferencian un poco en la cantidad de muestras por bit, considerando que la primera red fue simulada con un número bastante bajo y la red final fue simulada con un número muy alto de las mismas, tal como se mencionó en la sección 3.3.

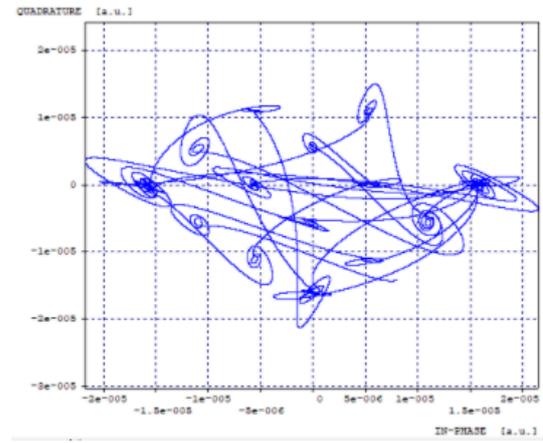
Para el servicio de vídeo, tal como se mencionó anteriormente, al considerar que se trata de un sistema basado en modulación multinivel (16-QAM) no existen componentes de medición dentro de la herramienta software OptSim que puedan determinar con precisión los parámetros de desempeño físico, debido a que se trata de señales que están compuestas por una componente en fase y otra en cuadratura, y los componentes de medida que ofrece la herramienta están diseñados únicamente para señales que hayan sido procesadas mediante técnicas de modulación binarias [55]. Sin embargo, existen gráficas como el diagrama de constelación que permiten inferir la calidad de la transmisión, y el diagrama del ojo donde se observa el traslape de los diferentes símbolos, aunque en este último, los valores asociados como: BER, factor Q, Jitter y apertura numérica, no corresponden a las medidas reales del sistema, debido a que solo sirven para sistemas con modulación binaria.

Por otra parte, es importante mencionar que para las redes de servicios en cuestión se configuraron diferentes parámetros de simulación, los cuales ocasionaron que hubiese más muestras por bit en la simulación de la red *Quad Play*, generando diferencias significativas entre sus gráficas; en particular, la simulación de la red *Triple Play* fue con un *tramo de tiempo simulado* de 12 ns, mientras que la simulación de la red *Quad Play* fue con 10000 ns, lo que causó muchas más muestras por bit en el segundo caso, y por lo cual el diagrama de constelación obtenido no pudo ser interpretado de forma clara, debido a la masiva superposición de los símbolos (Véase Figura 3.66). Lo anterior se realizó considerando que para la correcta simulación del módulo RoF se requiere de mínimo 2000 ns de *tramo de tiempo simulado*, por lo cual, al integrar las redes y para garantizar un buen rendimiento del servicio de Internet móvil la configuración de los parámetros de simulación de la red *Quad Play* fue la misma que la configurada en la red RoF independiente.

Considerando lo anterior, se realizó una simulación extra en donde la red *Triple Play* y la red *Quad Play* manejaron la misma configuración de simulación, es decir, se simuló la red *Quad Play* bajo los mismos parámetros establecidos en la simulación de la red *Triple Play* (un *tramo de tiempo simulado* de 12 ns). Los resultados en relación al servicio de Internet móvil, como era de esperarse, fueron insuficientes, mientras que para los servicios *Triple Play*, en especial, el servicio de vídeo, se obtuvieron resultados gráficos muy similares, tal como se aprecia en la Figura 3.78 y en la Figura 3.79.

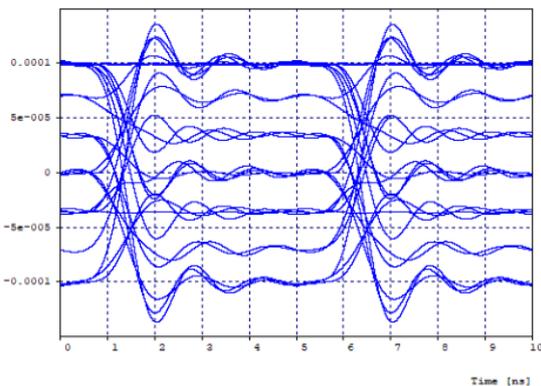


(a)

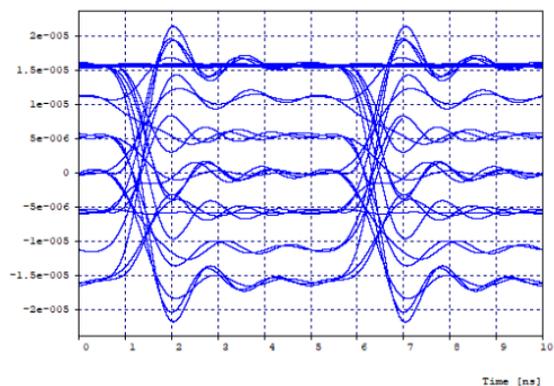


(b)

Figura 3.78. Diagrama de constelación obtenido de la señal de vídeo, para 1 ONT a 5 Km de distancia, con un *tramo de tiempo simulado* de 12 ns. (a) Red FTTH-GPON *Triple Play*. (b) Red FTTH-GPON *Quad Play*.



(a)



(b)

Figura 3.79. Diagrama de ojo, en cuadratura, obtenido de la señal de vídeo, para 1 ONT a 5 Km de distancia, con un *tramo de tiempo simulado* de 12 ns. (a) Red FTTH-GPON *Triple Play*. (b) Red FTTH-GPON *Quad Play*.

En la Figura 3.78 y Figura 3.79 se aprecia claramente que, si se manejan las mismas opciones en la simulación de cada una de las redes, la integración del servicio de Internet móvil no afecta negativamente al servicio de vídeo.

3.4.2. SERVICIO DE INTERNET MÓVIL

El servicio de Internet móvil prestado por la red RoF y la red *Quad Play* fue caracterizado a partir de las especificaciones técnicas de los sistemas móviles 5G, y su desempeño físico fue medido en niveles porcentuales de EVM, al variar los diferentes formatos de modulación de la técnica M-QAM. Por lo cual, existen dos perspectivas de análisis, los valores mínimos requeridos de EVM que estipula el *Release 15* de la 3GPP, y el paradigma típico de los sistemas de radiotelefonía de una BER máxima permitida de 10^{-3} , valor que, tal como se mencionó anteriormente, puede ser aproximado a niveles porcentuales de EVM.

En primer lugar, en cuanto a las consideraciones estipuladas en el *Release 15*, los resultados obtenidos para los valores de distancia máximos alcanzados se presentan en la Tabla 3.24, para las configuraciones simuladas.

Tabla 3.24. Resultados de EVM críticos vs distancia máxima alcanzada.

Arreglo	QPSK		16-QAM		64-QAM		256-QAM	
	RoF	<i>QuadPlay</i>	RoF	<i>QuadPlay</i>	RoF	<i>QuadPlay</i>	RoF	<i>QuadPlay</i>
p2p	d = 10Km	d = 8 Km	d = 11Km	d = 10Km	d = 9 Km	d = 10Km	d = 1 Km	
	17,28%	17,29 %	11,07 %	12,49 %	6,83 %	7,47 %	4,61 %	4,67 %
1-2	Rx 1	ONT 2	Rx 2	ONT1	Rx 1	ONT 2	Rx 1	ONT2
	d = 9 Km	d = 8 Km	d = 11Km	d = 9 Km	d = 9 Km	d = 9 Km	d = 1 Km	
	16,84 %	17,47 %	11,55 %	12,04 %	7,03 %	7,31 %	4,88 %	4,28 %
1-4	Rx 2	ONT 2	Rx 4	ONT4	Rx 4	ONT 2	Rx 2	ONT 2
	d = 9 Km	d = 8 Km	d = 11Km	d = 9 Km	d = 9 Km	d = 9 Km	d = 1 Km	
	16,84 %	17,40 %	11,61 %	12,43 %	7,00 %	7,31 %	4,70 %	4,43 %
1-8	Rx 3	ONT 8	Rx 1	ONT 1	Rx 1	ONT 3	Rx 7	ONT 6
	d = 9 Km	d = 8 Km	d = 11Km	d = 9 Km	d = 9 Km	d = 9 Km	d = 1 Km	
	17,19 %	17,45 %	12,31 %	12,33 %	7,50 %	7,49 %	5,22 %	4,79 %

A partir de la Tabla 3.24, se evidencian las siguientes situaciones:

1. El formato 256-QAM no presentó un buen rendimiento ni para 1 Km de longitud del enlace en todos los casos evaluados.
2. Se alcanzaron mayores distancias (1 y 2 Km) en la red RoF independiente que en la red *Quad Play* en todos los casos simulados excepto cuando el formato fue 64-QAM, en donde, para una topología p2p se alcanzó 1 Km menos de distancia, y en las demás topologías se cubrió la misma distancia, con un rendimiento un poco mejor en la red RoF (excepto para el arreglo de 8 usuarios).
3. En la red RoF independiente el formato que mejor desempeño presentó fue 16-QAM, seguido de QPSK y 64-QAM, respectivamente, mientras que en la red *Quad Play* los formatos que mejor se comportaron fueron 16-QAM y 64-QAM, seguido de QPSK.
4. El impacto de la topología dentro del rendimiento del sistema tuvo comportamientos diversos en cada red; en la red RoF, la incidencia fue mínima, presentándose únicamente una penalidad de 1 Km en el formato QPSK cuando se cambió de una topología p2p a una topología p2mp; en la red *Quad Play*, por su parte, el impacto también fue mínimo pero se presentó el comportamiento inverso, es decir, se presentó una penalidad de 1 Km únicamente en los formatos 16-QAM y 64-QAM cuando la topología sea cambió de p2p a p2mp, mientras que en QPSK se mantuvo constante.

En segundo lugar, en cuanto a las condiciones de BER máxima permitida, los resultados obtenidos para los valores de distancia máximos alcanzados se presentan en la Tabla 3.24, para las configuraciones simuladas.

Tabla 3.25. Resultados de BER crítica vs distancia máxima alcanzada.

Arreglo	QPSK		16-QAM		64-QAM		256-QAM	
	RoF	<i>QuadPlay</i>	RoF	<i>QuadPlay</i>	RoF	<i>QuadPlay</i>	RoF	<i>QuadPlay</i>
p2p	d = 12Km	d = 12Km	d = 13Km	d = 11Km	d = 9 Km	d = 9Km	d = 1 Km	
	1,13x10 ⁻⁴	4,01x10 ⁻⁴	6,81x10 ⁻⁴	2,7x10 ⁻⁴	4,08x10 ⁻⁴	10 ⁻³	0,066	0,076
1-2	Rx 2	ONT 2	Rx 1	ONT1	Rx 1	ONT 2	Rx 1	ONT2
	d = 12Km	d = 12Km	d = 12Km	d = 11Km	d = 9 Km	d = 9 Km	d = 1 Km	
	1,2x10 ⁻⁴	4,01x10 ⁻⁴	6,8x10 ⁻⁴	4,9x10 ⁻⁴	5,5x10 ⁻⁴	1,06x10 ⁻³	0,098	0,16
1-4	Rx 3	ONT 2	Rx 2	ONT 1	Rx 1	ONT 2	Rx 1	ONT 2
	d = 12Km	d = 12Km	d = 12Km	d = 11Km	d = 9 Km	d = 9 Km	d = 1 Km	
	1,2x10 ⁻⁴	5,9x10 ⁻⁴	6,8x10 ⁻⁴	6,8x10 ⁻⁴	5,4x10 ⁻³	8,3x10 ⁻⁴	0,089	0,053
1-8	Rx 8	ONT 8	Rx 6	ONT 6	Rx 2	ONT 5	Rx 7	ONT 6
	d = 11Km	d = 11Km	d = 12Km	d = 11Km	d = 9 Km	d = 9 Km	d = 1 Km	
	6,7x10 ⁻⁴	9,6x10 ⁻⁴	9,8x10 ⁻⁴	9 x10 ⁻⁴	10 ⁻³	10 ⁻³	0,141	0,088

A partir de la Tabla 3.25, se evidencian las siguientes situaciones:

1. El formato 256-QAM no presentó un buen rendimiento ni para 1 Km de longitud del enlace en todos los casos evaluados.
2. Se alcanzaron mayores distancias (1 y 2 Km) en la red RoF independiente que en la red *Quad Play* únicamente para el formato 16-QAM, mientras que para los formatos QPSK y 64-QAM se cubrió la misma distancia en ambas redes.
3. En la red RoF independiente el formato que mejor desempeño presentó fue 16-QAM, seguido de QPSK y 64-QAM, respectivamente, mientras que en la red *Quad Play* el formato que mejor se comportó fue QPSK, seguido de 16-QAM y 64-QAM, respectivamente.
4. El impacto de la topología dentro del rendimiento del sistema tuvo comportamientos diversos en cada red; en la red RoF, la incidencia fue mínima, presentándose únicamente una penalidad de 1 Km en el formato QPSK cuando se cambió de un arreglo de 4 usuarios a un arreglo de 8 usuarios, y de 1 Km en el formato 16-QAM cuando se cambió de la topología p2p a la topología p2mp; en la red *Quad Play*, por su parte, el impacto también fue mínimo presentándose únicamente una penalidad de 1 Km en el formato QPSK cuando se cambió de un arreglo de 4 usuarios a un arreglo de 8 usuarios, mientras que en 16-QAM y 64-QAM la distancia se mantuvo constante.

CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este capítulo, se describen las conclusiones, recomendaciones y perspectivas en torno los resultados alcanzados. Las conclusiones se clasifican en dos: Respecto a los resultados obtenidos y respecto a la herramienta de simulación empleada.

4.1 CONCLUSIONES

4.1.1 RESPECTO A LOS RESULTADOS OBTENIDOS

Desempeño de la Red FTTH-GPON Triple Play.

- El rendimiento físico del servicio de VoIP/Datos, en términos de BER, factor Q, *Jitter*, diagrama del ojo, potencia recibida, fue óptimo en los casos de estudio evaluados, es decir, para 1 y 8 ONTs a distancias de 5 y 20 Km, donde se presentaron las menores medidas de BER y factor Q posibles dentro de un sistema de comunicación de datos (10^{-40} y 34dB), sin importar la cantidad de usuarios, y hasta una distancia máxima de 20 Km.
- El rendimiento físico del servicio de CATV Digital solo puede ser medido de forma gráfica, dentro de la herramienta de simulación, al tratarse de un sistema con modulación multinivel, sin embargo, al tratarse de un proceso de simulación configurado con un *Tramo de tiempo simulado* muy corto, según diferentes estudios [11, 21, 50] es posible hacer una aproximación entre los valores obtenidos en la lectura del diagrama del ojo, con los valores reales del sistema. Por lo tanto, al considerar esta aproximación se puede concluir que el servicio de CATV Digital, presenta unas excelentes condiciones de servicio, para los casos de estudio evaluados, donde se obtuvo valores de BER entre 10^{-7} y 10^{-10} , siendo el valor máximo permitido de 10^{-6} concorde a las consideraciones estipuladas por el formato de video MPEG-2.

Sobre la aproximación teórica de la Tasa de Error de Bit con la Magnitud del Vector de Error.

- Para el caso de QPSK, al contemplar el valor umbral de BER de 10^{-3} , se obtuvo un valor de EVM del 26,4%, mientras que el EVM umbral de 17,5% definido en el *Release 15* tiene asociado un valor de BER de $1,5 \times 10^{-6}$, lo cual indica que se presentan mejores condiciones de análisis cuando se hace bajo la perspectiva de la BER.
- Para el caso de 16-QAM, el valor umbral de BER indica que se requiere un EVM mínimo de 14,87%, mientras que el valor umbral de EVM de 12% estipula que se requiere de una BER máxima de $1,3 \times 10^{-4}$ aproximadamente, lo cual indica que se presentan mejores condiciones de análisis bajo la perspectiva de la BER.
- Para el caso de 64-QAM, se presentó una situación contraria a los formatos anteriores, donde se presentan mejores condiciones de análisis bajo las consideraciones estipuladas en el estándar 5G, debido a que para el valor umbral de EVM (8%) se obtiene una BER de $1,86 \times 10^{-3}$, y para el valor umbral de BER se obtiene un EVM del

7,45% (0,65% menos que el estipulado en el estándar), aunque no dejan de ser valores muy similares entre sí.

- Para el caso de 256-QAM, el valor umbral de BER indica que se requiere un EVM mínimo de 2,98% (0,52% menos que lo estipulado en el estándar), mientras que el valor umbral de EVM requerido tiene asociado un valor de BER de $7,28 \times 10^{-3}$, lo cual indica que bajo este esquema se presentan mejores condiciones de análisis bajo la perspectiva del EVM, aunque si bien no presenta mayor diferencia entre ambas.

Incidencia de M-QAM sobre la Red RoF de Internet móvil.

- Para una topología punto a punto, si se analiza el sistema en términos del paradigma máximo de BER permitido de 10^{-3} , se concluye que el formato de modulación que mejor desempeño presentó fue 16-QAM donde se alcanzó una distancia máxima de 13 Km, seguido del formato QPSK donde se dio una buena cobertura hasta 12 Km, seguido del formato 64-QAM donde se logró transmitir a una distancia máxima del enlace troncal de fibra de 9 Km.
- Para una topología punto a punto, si se analiza el sistema en términos de los valores mínimos requeridos que estipula el *Release 15* para cada formato de modulación M-QAM rectangular, se concluye que para 16-QAM se logró el mejor desempeño debido a que se alcanzó una distancia de 11 Km de cobertura en buenas condiciones, seguido nuevamente del formato QPSK donde se obtuvo un buen desempeño hasta una distancia de 10 Km, y seguido nuevamente de 64-QAM donde se alcanzó un tramo de fibra troncal de 9 Km de longitud.
- En general, para una topología punto a punto, el sistema presenta un mejor desempeño cuando se modula con 16-QAM, seguido de QPSK y 64-QAM, donde se alcanzaron distancias mínimas de 9 Km y distancias máximas de 13 Km de longitud del enlace. Resultados que indican un muy buen desempeño si se compara los resultados obtenidos en [11], donde se alcanzó una distancia máxima de 5,9 Km en un sistema modulado bajo 16-QAM y 8 subportadoras OFDM.
- Para la topología punto a multipunto, si se analiza el sistema en términos del parámetro BER donde el valor máximo permitido es 10^{-3} , se concluye que el esquema de modulación 16-QAM es el que mejor desempeño presenta para todos los arreglos configurados, debido a que alcanza mayores longitudes de cobertura del enlace de fibra troncal (12 Km). Aunque cabe resaltar, que para los arreglos de 2 y 4 usuarios el formato QPSK alcanza los mismos valores de distancia máxima, generando también un buen rendimiento físico en términos de recuperación de la información, y además, para 64-QAM se alcanzan 9 Km en todos los arreglos simulados. En cuanto a los valores máximos de distancia alcanzados, se concluye que no existe un gran impacto en el desempeño del servicio, cuando se aumenta la cantidad de usuarios finales, ya que en el peor de los casos se evidencia una penalidad máxima de 1 Km de distancia en comparación a los resultados obtenidos para la topología punto a punto.
- Para la topología punto a multipunto, si se realiza un análisis de resultados en torno a los valores de EVM mínimos que exige el *Release 15*, se concluye que el formato 16-QAM es el que mejor desempeño presenta al alcanzar una distancia máxima de 11

Km en todos los arreglos evaluados. Sin embargo, los formatos QPSK y 64-QAM también presentan un muy buen rendimiento al alcanzar 9 Km de distancia en cada una de las configuraciones evaluadas.

- El formato de modulación 256-QAM no presenta un buen rendimiento para ningún valor de distancia evaluado, tanto para la topología punto a punto, como para la topología punto a multipunto.

Coexistencia de los servicios Quad Play en la red FTTH-GPON.

- La integración entre los sistemas se hizo con base en los lineamientos de la recomendación ITU-T G.984.5, donde se especifica la nueva banda mejorada del estándar GPON, en la cual se establece una nueva opción de propagación dentro del espectro óptico para la prestación de servicios NGA y de distribución de vídeo, sin embargo, no define ninguna consideración técnica respecto a la velocidad de transmisión de los mismos, por lo cual, debido a que el objetivo de los sistemas RoF en el ámbito de las MMW es brindar velocidades de los Multi-Gbps, se integró el sistema RoF a la red FTTH-GPON convencional, para la prestación del servicio de Internet móvil a velocidades del orden de los 10 Gbps, generando un muy buen desempeño en la red, al alcanzar una distancia máxima de 12 Km bajo las mejores condiciones técnicas y de análisis que envuelven el sistema, lo cual corresponde a aproximadamente el doble de lo alcanzado en la investigación [11] en la cual se diseñó una red FTTH-GPON *Quad Play* con una arquitectura física muy similar a la diseñada en la presente investigación.
- La integración de la red RoF al sistema FTTH-GPON convencional, no produjo ningún cambio significativo en el desempeño de los servicios de VoIP/datos en términos de los parámetros OPM (atenuación, BER, factor Q, jitter, dispersión cromática, entre otros), donde se obtuvo un óptimo rendimiento en relación a la BER y el factor Q, sin importar la cantidad de ONTs ni los valores de distancia evaluados.
- La convergencia entre los sistemas que dieron fruto a la red *Quad Play*, a nivel de simulación, produjo un cambio significativo en las condiciones de análisis que rodean al servicio de CATV Digital, donde ya no es posible estimar de forma exacta una medida real de la BER, factor Q o Jitter, debido al cambio de configuración de la simulación, por lo cual, para el análisis físico de la señal asociada al servicio de vídeo, se obtuvo únicamente su diagrama de constelación asociado (modulado en 16-QAM) a todos los arreglos configurados, que a pesar de no ser muy visible (debido a la gran cantidad de muestras por bit por instante de tiempo), cuando se simula la red con una cantidad de muestras por bit mucho menor, presenta una forma muy similar que la obtenida cuando se evaluó la red *Triple Play* independiente.

Incidencia de M-QAM sobre el módulo RoF después de incorporarlo a una red FTTH-GPON.

- Para el caso de 1 ONT, si se analiza el desempeño del servicio de Internet móvil bajo las pautas que propone el estándar 5G, el mejor desempeño, en términos de distancia máxima alcanzada, se logró al modular la información mediante los formatos 16-QAM y 64-QAM, donde se logró una cobertura de 10 Km, dejando en segundo lugar al formato QPSK bajo el cual se alcanzaron 8 Km.

- Para el caso de 1 ONT, si se realiza un análisis en relación a la máxima BER permitida, el formato de modulación bajo el cual se presenta un mejor desempeño en el sistema es QPSK, donde se logra alcanzar un tramo de fibra troncal de 12 Km, siendo mayor a lo alcanzado mediante los formatos 16-QAM y 64-QAM los cuales permiten un tramo máximo de 11 Km y 9 Km de longitud, respectivamente.
- Para el caso de varias ONTs, si se considera los valores de EVM mínimos requeridos que sugiere el *Release 15*, los formatos 16-QAM y 64-QAM son los que mejor desempeño presentan al lograr una cobertura del enlace óptico de 9 Km, en comparación a los 8 Km alcanzados por el formato QPSK.
- Para el caso de varias ONTs, si se tiene en cuenta el valor máximo de BER permitido, se concluye que el formato de modulación que mejor desempeño presenta es QPSK, bajo el cual se logró alcanzar 12 Km de longitud en los arreglos de 2 y 4 ONTs, y 11 Km de longitud en el arreglo de 8 ONTs. no obstante, el esquema 16-QAM también presentó un muy buen rendimiento al lograr alcanzar 11 Km de cobertura en todos los arreglos evaluados, como también, el esquema 64-QAM bajo el cual se alcanzó una distancia máxima de 9 Km en todos los casos de estudio evaluados.
- El formato de modulación 256-QAM, presentó un rendimiento insuficiente en todos los casos de estudio evaluados, es decir, bajo ambas perspectivas de análisis (EVM, BER), bajo valores de distancia entre 1 y 5 Km, bajo los arreglos de 1, 2, 4 y 8 ONTs, lo cual permite concluir que los resultados obtenidos son coherentes a lo estipulado en el *Release 15* donde ni siquiera se establece el formato 256-QAM para la prestación de servicios móviles en las ondas MMW.

4.1.2 RESPECTO A LA HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN

- El entorno de simulación que ofrece la herramienta OptSim es un gran motor de simulación que modela correctamente todos los fenómenos asociados a la propagación por medio de fibra óptica, y el cual ofrece una amplia gama de componentes que permiten un correcto modelamiento de sistemas ópticos de comunicación de datos complejos.
- Para sistemas OFDM, según el soporte técnico de OptSim, la herramienta debe ser configurada con un *tramo de tiempo simulado* de mínimo 2000 ns para un correcto procesamiento interno de los componentes asociados a los sistemas OFDM, lo cual implica un gasto mucho mayor en tiempo de simulación, sin embargo, al no ser configurado este parámetro de simulación con el umbral mínimo, existe una gran posibilidad de presentarse errores en la estimación de los resultados, en particular si la cantidad de subportadoras configuradas en el sistema supera las 128.

4.2 RECOMENDACIONES

Para la implementación y simulación del sistema FTTH-GPON *Quad Play* se deben considerar las siguientes recomendaciones:

- Para la simulación de las redes diseñadas, es necesario contar con un equipo de cómputo de alta capacidad de procesamiento, alta capacidad de memoria de solo

lectura, y una gran capacidad de almacenamiento, debido a que los sistemas diseñados, en especial el sistema RoF, se caracteriza por ser uno de los sistemas más complejos dentro de la librería del modo muestra.

- El sistema FTTH-GPON *Quad Play* diseñado tuvo como principal inconveniente, dentro del proceso de simulación, la gran cantidad de recursos computacionales empleados durante el mismo, lo que ocasionó tener tiempos de simulación muy extensos, de casi más de 12 horas en el mejor de los casos, y siendo más de 60 horas en la peor de las situaciones; lo anterior se debe a que la simulación se configuró con un ancho de banda de 65 nm, lo que implica un número muy grande de muestras por bit, y al tener un *Tramo de tiempo simulado* de 8000 ns, el número de muestras por bit por instante de tiempo se hace muy elevado, dificultando el proceso de simulación, en términos de tiempo de respuesta. A partir de lo anterior, se recomienda que, si se quiere apreciar el comportamiento de algún caso de estudio en particular y que no conlleve mucho tiempo de simulación, es posible acercar la longitud de onda de operación del servicio de VoIP (1490 nm) a un valor muy próximo de la ventana de los 1550 nm, lo cual implicaría que se pueda reducir el ancho de banda de la simulación de 65 nm al orden de los 10 o 20 nm, produciendo una reducción muy considerable en los tiempos requeridos para el proceso de simulación.

4.3 TRABAJOS FUTUROS

Esta investigación, aporta una base conceptual en relación a las temáticas involucradas en la posible prestación de servicios *Quad Play*, y sirve como base para la futura implementación de proyectos relacionados a sistemas RoF en el ámbito institucional. En particular, se propone una serie de trabajos futuros que se listan a continuación:

- Analizar el impacto que tiene configurar el sistema RoF basado en OFDM con diferentes cantidades de subportadoras OFDM, en términos de desempeño físico (Parámetros OPM).
- Analizar el impacto que tiene la heterodinación óptica y el método *up & down conversion* en términos del desempeño físico del sistema RoF (Parámetros OPM).
- Analizar el comportamiento del sistema RoF si se implementa un modelo de canal inalámbrico que caracterice una celda 5G, al aprovechar las nuevas bondades que ofrece la herramienta OptSim en sus versiones más recientes.
- Diseñar un componente externo, desarrollado en MATLAB, que permita interpretar la señal de vídeo CATV Digital recibida y proporcionar una medida real del rendimiento del servicio en términos de los parámetros OPM.
- Analizar el impacto de diferentes arquitecturas de red PON, tales como: XGPON, NG-PON, WDM-PON, en la prestación de servicios *Quad Play*.
- Estudio de factibilidad técnico-económico del despliegue de una red FTTH-GPON para la prestación de servicios *Quad Play*, en el territorio nacional.

- Diseño de un sistema RoF, para la prestación de servicios inalámbricos tomando como referencia otros estándares como: LTE, WiFi, Wireless HD, WiMax, televisión satelital DVB-ST.
- Diseño de un sistema RoF completo, es decir, con modelos de canal óptico e inalámbrico, desarrollados a través de MATLAB, para celdas de corto alcance.
- Explorar herramientas que permitan el modelamiento del sistema en el enlace de subida, y realizar el respectivo análisis de desempeño físico cuando se trata de servicios móviles 5G.
- Diseñar una nueva infraestructura de red para el sistema RoF, donde se implementen amplificadores ópticos para lograr el mayor alcance posible.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] V. Mendieta, S. Duarte, "Estudio sobre tecnologías xDSL Digital Subscriber Line, Universidad Católica, Departamento de Electrónica e Informática, Asunción, Paraguay, 2002.
- [2] J. O. García Lozano, «Qué es FTTx y sus aplicaciones,» *Telemediciones*, 2016. [En línea]. Available: <http://telemediciones.com/blog/fibra-optica/que-es-fttx-y-sus-aplicaciones/>.
- [3] R. Tejedor Millan, "GPON (Gigabit Passive Optical Network)," *BIT* n° 166, COIT & AEIT, n° 166, enero 2008.
- [4] Tafur Monroy, N. Guerrero González y A. Caballero, "Convergencia de sistemas de comunicación ópticos e inalámbricos," *óptica pura y aplicada*, p. 83, febrero 2009.
- [5] M. Weiß, M. Huchard, A. Stöhr, B. Charbonnier, S. Fedderwitz, and D. Stefan, "60-GHz photonic millimeter-wave link for short- to medium-range Wireless transmission pp to 12.5 Gb/s", *J. Lightw. Technol.*, vol. 26, n° 15, pp. 2424-2429, Aug. 2008
- [6] C. Serpa Imbett, G. Varón Durán, J. J. Granada Torres y N. Guerrero González, "Hacia la próxima generación de sistemas de Radio sobre Fibra de banda ancha retos tecnológicos en la banda de las ondas milimétricas," *Ingeniería & Desarrollo*, vol. 2, n° 29, pp. 242-265, Marzo 2011.
- [7] R. Karthikeyan, S. Prakasam, "A Survey on Radio over Fiber (RoF) for Wireless Broadband Access Technologies," *International Journal of Computer Applications*, vol. 64, n° 12, pp. 14-19, Febrero 2013
- [8] K. Ortiz, F. Rodriguez, J. Velazques, "Implementación de una propuesta de Radio sobre Fibra para las comunicaciones de redes móviles basadas en Femtoceldas," *Colombian Conference on Communications and Computing (COLCOM)*, 2015.
- [9] D.Pintor, "Diseño y simulación de un sistema de transmisión de fibra óptica en banda base y con múltiples subportadoras de RF," Trabajo de grado., Fac., Ing., Distrital Francisco José de Caldas Univ., Bogota, Colombia, 2017.
- [10] A. F. Betancur-Pérez, J. J. Granada-Torres y Neil Guerrero-González, "Redes elásticas del futuro: beneficios para la red interna de telecomunicaciones de Colombia," *Revista Tecno Lógicas*, Vol. 18, No. 34, pp. 125-136, 2015.
- [11] A. Escallon, V. Ruiz, "Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad-Play* al integrar un módulo RoF," Tesis de Maestría., Universidad del Cauca., Popayán, Colombia, 2017.
- [12] J. Cartagena, "Redes HFC (Hybrid Fiber-Coaxial) y sus vulnerabilidades," Universidad Técnica Federico Santa María, Departamento de Electrónica, Valparaíso, Chile, 2008.

- [13] M. Lattanzi, A. Graf, "Redes FTTx: Conceptos y Aplicaciones" . Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos IEEE, Argentina, 2016.
- [14] Harris, S, "FTTX Technologies". Society of Cable Telecommunications Engineers, 2016.
- [15] N. Neumann, R. Trieb, S. Frach, D. Plettemeier, "FTTA System Demo Using Optical Fiber Coupled Active Antennas," *Photonics*, Vol1, pp. 198-210, 2014.
- [16] T. Ronan, "Deploying Reliable Fiber-to-the-Antenna Networks," JDSU Fiber Optic Division, USA, 2013.
- [17] IEEE, IEEE Standard 802.3ah-2004, Amendment to IEEE Standard 802.3-2002, New York, IEEE, 2004.
- [18] FS.COM, "ABC of PON: Understanding OLT, ONU, ONT and ODN", Blog of FS.COM, 13-mayo-2015. [En Línea]. Disponible: <https://community.fs.com/blog/abc-of-pon-understanding-olt-onu-ont-and-odn.html>
- [19] I. Cale, A. Salihovic, M. Ivekovic, "Gigabit passive optical network," *29th International Conference On, Information Technologies Interfaces*, pp. 679-684, 2007.
- [20] Cobos. V, "Design and Performance Evaluation of Passive Optical Networks", Universidad Politecnica de Cataluña, Escuela de Ingeniería de Telecomunicación y Aeroespacial de Castelldefels, Barcelona, España, 2011
- [21] J. Delgado, J. Marcillo, "Impacto De La Topología De Red FTTH-GEPON En El Desempeño De Servicios Triple Play," Trabajo de grado., Dpto., Teleco., Cauca Univ., Cauca, Colombia, 2016
- [22] M. López, E. Moschim, F. Rudge, "Estudio Comparativo de Redes GPON y EPON," *Scientia et Technica*, no. 41, pp. 321-326, May. 2009.
- [23] T. Taniguchi, N. Sakurai, H. Kimura, K. Kumozaki, "Technical Trends in Millimeter-wave Band Radio-On-Fiber Access System," *PIERS ONLINE*, Vol. 5, N° 5, pp. 297-300, 2009.
- [24] J. Morales, "Estudio de la evolución y tendencia de la tecnología RoF," Tesis de Maestría., Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador, 2015.
- [25] R. Karthikeyan, S. Prakasam, "A Review-OFDM-RoF (Radio over Fiber) System for Wireless Network," *International Journal of Research in Computer and Communication Technology*, Vol. 3, Issue 3, pp.344-349, 2014.
- [26] C. W. Chow, C. H. Yeh, C. H. Wang, C. L. Wu, S. Chi, y C. Lin, "Studies of OFDM Signal for Broadband Optical Access Network," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. vol. 28, N° 6, pp.800-807, 2010.

- [27] R. Karthikeyanm, S. Prakasam, "OFDM Signal Improvement Using Radio over Fiber for Wireless System," *International Journal of Computer Networks and Wireless Communications*, vol. 3, N° 3, pp. 287-291. 2013.
- [28] L. López, *La técnica de modulación OFDM*, México, 2011.
- [29] R. Vaquero, "Estudio de algoritmos ciegos de estimación de canal," Trabajo de Investigación., Escuela Técnica Superior de Ingenieros, 2009.
- [30] L. Jiménez, J. Parrado, C. Quiza, C. Suárez, "Modulación multiportadora OFDM," *Revista Ingeniería*, vol. 6, N° 2, pp. 30-34, 2001.
- [31] Department of Computer Science & Information Engineering, "Orthogonal Frequency Division Modulation (OFDM)," [En Línea]. Disponible: https://www.csie.ntu.edu.tw/~hsinmu/courses/ media/wn_11fall/ofdm_new.pdf
- [32] Y. Zhang, "Development of Millimeter-Wave Radio-over-Fiber Technology," *Journal of Electronic Science and Technology*, Vol. 9., N° 1, pp. 58-66. 2011.
- [33] H. Bong Kim, "Radio over Fiber based Network Architecture," Tesis de Máster., Technischen Universität Berlin, Berlin, Alemania, 2005.
- [34] D. Guamialama, "Análisis de sistemas de generación y transporte de señales MMW en sistemas RoF a 60 GHz," Tesis de Máster., Depto., Comunicaciones., Universidad Politécnica de Valencia., Valencia, España, 2013.
- [35] N. Amagua, N. Mogro, "Análisis y simulación de un enlace de radio sobre fibra óptica (RoF) a 60 GHz," Trabajo de Grado., Universidad Politécnica Salesiana de Quito., Quito, 2013.
- [36] J. Aguilera, "Análisis comparativo del rendimiento de los moduladores Mach-Zehnder y electroabsorción para comunicaciones ópticas," Tesis de Maestría., Universidad Católica de Santiago de Guayaquil., Guayaquil, Ecuador, 2018.
- [37] J. Muñoz, J. Zemanate, "Análisis del desempeño de un sistema de comunicaciones con modulación 16/64 QAM basado en hardware reconfigurable," Trabajo de Grado., Dpto., Teleco., Cauca Univ., Cauca, Colombia, 2014.
- [38] Ikaskuntza Birtual eta Digitalizatuen LHII (BIRT LH), "La señal de radiodifusión. Primera parte: TV Terrestre," [En línea]. Disponible: https://ikastaroak.ulhi.net/edu/es/IEA/ICTV/ICTV02/es IEA ICTV02 Contenidos/webseite_index.html
- [39] R. Gallager, "Channels, Modulation and Demodulation," En: "Course Materials for 6450 Principles of Digital Communications I," MIT OpenCourseWare (<http://ocw.mit.edu/>), Massachusetts Institute of Technology, 2006. Descargado el [01-08-2019].

- [40] M. Cabrera, F. Tarrés. Comunicaciones Digitales Paso Banda, Universitat Oberta de Catalunya, 2013.
- [41] R. Guayaquil, "Diseño de una GUI en MATLAB para evaluar técnicas de modulación en amplitud y cuadratura (QAM)," Tesis de Maestría., Universidad Católica de Santiago de Guayaquil., Guayaquil, Ecuador, 2018.
- [42] A. Escallon y J. Barrios, "Criterios para el monitoreo del canal óptico y la incidencia de los parámetros que afectan la calidad de la señal óptica en el desempeño de una red metropolitana WDM," Trabajo de Grado., Universidad del Cauca., Popayán, 2008
- [43] J. G. Lopez, "Diseño de métodos cross layer cognitivos para redes de comunicación óptica de ráfagas (OBS)," Tesis Doctoral. Universidad del Cauca. Popayán, Colombia, 2014.
- [44] J. M. C. Muñoz, "Metodología para la Simulación de Equipos de Telecomunicaciones", Trabajo de Grado., Depto., Teleco., Cauca Univ., Cauca, Colombia, 1995.
- [45] Rsoft, «OptSim 4.6.,» Rsoft, [En línea]. Disponible: http://www.rsoftdesign.com/products/system_simulation/OptSim/.
- [46] R. I.-T.-U. T G.697, «"Supervisión óptica para sistemas de multiplexación por división en longitud de onda",» Junio, 2004.
- [47] M. McKinley, K. Remley, M. Myslinski, J. Stevenson, D. Schreurs, y B. Nauwelaers, "EVM Calculation for Broadband Modulated Signals," 64th ARTFG Conf. Dig., Orlando, pp. 45-52, 2004.
- [48] A. Lipovac, B. Modlic, M. Grgic, "OFDM Error Floor Based EVM Estimation," 24th International Conferences on Software, Telecommunications and Computer Networks SoftCOM, Split, pp. 1-5. 2016.
- [49] J. Grijalba, G. Gómez, "Análisis del desempeño de formatos de modulación en comunicaciones ópticas sobre redes WDM," Trabajo de Grado., Depto., Teleco., Cauca Univ., Cauca, Colombia, 2010.
- [50] I. Velasco, M. Melo, "Estudio de factibilidad técnico-económico para la implementación de una red FTTH-GPON en el contexto colombiano para servicios triple play," Trabajo de Grado., Depto., Teleco., Cauca Univ., Cauca, Colombia, 2018.
- [51] Telecommunication Standardization Sector of ITU, "Recommendation ITU-T G.984.1 Series G: Transmission systems and media, digital systems and networks. Digital sections and digital line system – Optical line systems for local and access networks", 2008.
- [52] Telecommunication Standardization Sector of ITU, "Recommendation ITU-T G.984.5-Gigabit-capable passive optical networks (GPON): Enhancement band," 2014.

- [53] Third Generation Partnership Project 3GPP, "Release 15 Description, Technical Specification Group Service and System Aspects," Septiembre de 2019.
- [54] Third Generation Partnership Project 3GPP, "Physcals Channels and Modulation (Release 15)," Septiembre de 2019.
- [55] Synopsys Inc. Photonic Solutions, "OptSim Models Reference, Volume I Sample Mode," New York, 2019.