



# Universidad de Cuenca

## Facultad de Ingeniería

### Carrera de Electrónica y Telecomunicaciones

---

## Análisis del rendimiento y eficiencia de un sistema Radio-over-Fiber sobre una red PON mediante Optisystem.

---

---

*Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones.*

---

#### **Autores :**

Iván Fernando Cabrera Cochancela C.I. 010592806-3  
ivanfercochancela@gmail.com

José Andrés Zambrano Jaramillo C.I. 070385070-1  
joan.zambranoj@gmail.com

#### **Director :**

Ing. Alcides Fabián Araujo Pacheco C.I. 010235850-4

---

Cuenca - Ecuador

2021



---

---

## Resumen

En el presente trabajo se estudiaron los sistemas radio sobre fibra “*Radio-over-Fiber (RoF)*” orientada a la aplicación de redes móviles, o más específicamente para el desarrollo de la tecnología celular 5G. Se estudió la inserción de la tecnología RoF sobre una red óptica pasiva gigabit “*Gigabit Passive Optic Network (GPON)*” - fibra hasta el hogar “*Fiber-to-the-home (FTTH)*”, empleándola como *fronthaul* para el servicio móvil. El aporte obtenido concuerda con los nuevos estándares de tecnología óptica-inalámbrica “*Fiber-Wireless (Fi-Wi)*” que se vienen desarrollando y dan una nueva perspectiva al momento de su implementación, tomándolo como referencia. Se plantearon las siguientes incógnitas: ¿Cual sería el rendimiento y eficiencia de una red FTTH al insertarse tecnología RoF para el servicio móvil?, ¿Se mantendrá el rendimiento y eficiencia o tendrá alguna perturbación?.

Las respuestas a las anteriores preguntas corresponden a la justificación del presente trabajo, orientado a expandir el campo de servicios aplicados sobre la fibra óptica sin que represente una mayor inversión a los interesados. Se utilizó el software OptiSystem para analizar el sistema FTTH-RoF para el servicio móvil. Inicialmente, se caracterizó una red GPON-FTTH considerando tanto el enlace de descarga como el de carga. De igual manera, se diseñó el sistema RoF, en sus dos versiones: radio sobre fibra analógica “*Analog-RoF (A-RoF)*” y radio sobre fibra digital “*Digital-RoF (D-RoF)*”, considerándolos como dos casos de estudio.

En ambos casos se utilizaron sistemas de multiplexación por división de frecuencia ortogonal “*Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)*” con modulación por amplitud en cuadratura “*Quadrature Amplitude Modulation (QAM)*”, con niveles de 4-QAM, 16-QAM y 64-QAM. Para el caso de la red FTTH, se consideró una tasa de bits de 2.5 Gbps para el enlace de descarga y 1.25 Gbps para el enlace de carga; mientras que para el sistema móvil, se simuló con una tasa de 5 Gbps para ambos enlaces.

Posteriormente, se incluyeron varios servicios por multiplexación logrando una convergencia que permitió evaluar su desempeño. La evaluación del rendimiento y eficiencia del sistema GPON-FTTH se realizó con base en los parámetros de monitoreo de desempeño óptico “*Optical Monitoring Parameter (OPM)*”, entre los cuales se consideraron los siguientes: atenuación, dispersión cromática, relación señal ruido óptico “*Optical Signal-to-Noise Ratio (OSNR)*”, tasa de error de bit “*Bit Error Rate (BER)*”, factor de calidad Q, diagrama de ojo y diagrama de constelación.

**Palabras clave : BER. Fibra. GPON. OptiSystem. Pérdidas. Factor de calidad Q.**



---

---

## Abstract

In the present work radio over fiber systems **RoF** aimed at the application of mobile networks or more specifically for the development of 5G cellular technology, were studied. The insertion of **RoF** technology on a **GPON-FTTH** network was studied, using it as a fronthaul for the mobile service. Contribution obtained is consistent with the new **Fi-Wi** technology standards that are being developed and gives a new perspective at the time of its implementation, taking it as a reference. Thus, the following questions were raised: What would be the performance and efficiency of a **FTTH** network when inserting **RoF** technology for the mobile service? Will the performance and efficiency be maintained or will it have any disturbance?

The answers to the previous questions correspond to the justification of this work, aimed at expanding the field of services applied to fiber optics without representing a greater investment to the interested parties. For the aforementioned, the OptiSystem software was used to analyze the **FTTH-RoF** system for the mobile service. Initially, a **GPON-FTTH** network was characterized considering both download link and upload link. Similarly, the **RoF** system was designed in its two versions: **A-RoF** and **D-RoF**, considering them as two case studies.

Both study cases were based on **OFDM** system with **QAM** modulation: 4-**QAM**, 16-**QAM** and 64-**QAM**. For the case of the **FTTH** network, a bit rate of 2.5 Gbps for download link and 1.25 Gbps for upload link was considered; while for mobile system, a bit rate of 5 Gbps was simulated for both links.

Subsequently, the system was multiplexed, achieving a convergence of services that made it possible to evaluate its performance. The performance and efficiency evaluation of **GPON-FTTH** system was performed based on **OPM** parameters, among which is considered to the following: attenuation, chromatic dispersion, signal-to-noise ratio **OSNR**, **BER**, quality factor **Q**, eye diagram and constellation diagram.

**Keywords** : **BER. Fiber. GPON. Losses. OptiSystem. Q factor.**



---

---

## Índice general

Resumen	I
Abstract	II
Índice general	III
Índice de figuras	VII
Índice de tablas	XI
Cláusula de Propiedad Intelectual	XII
Cláusula de Propiedad Intelectual	XIII
Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional	XIV
Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional	XV
Certifico	XVI
Dedicatoria	XVII
Dedicatoria	XVIII
Agradecimientos	XIX
Agradecimientos	XX
Abreviaciones y acrónimos	XXI
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Identificación del problema . . . . .	1
1.2. Justificación . . . . .	3
1.3. Alcance . . . . .	3
1.4. Objetivos . . . . .	4
1.4.1. Objetivo general . . . . .	4
1.4.2. Objetivos específicos . . . . .	4
1.5. Estado del arte . . . . .	4



<b>2. Aspectos teóricos y técnicos</b>	<b>7</b>
2.1. Aspectos técnicos de un sistema de comunicación óptico	7
2.1.1. Multiplexación por división de longitud de onda ampliamente espaciada (CWDM)	7
2.1.2. Multiplexación por división de longitud de onda densamente espaciada (DWDM)	8
2.2. Fundamentos para el monitoreo de canal óptico	8
2.2.1. Degradaciones ópticas y parámetros de monitoreo óptico	8
2.2.1.1. Degradaciones ópticas	9
2.2.1.2. Parámetros de monitoreo óptico	9
2.2.1.3. Correlación entre degradaciones ópticas y parámetros de monitoreo	10
2.2.2. Técnicas de monitoreo de desempeño óptico (OPM) para sistemas de detección directa	11
2.2.2.1. Revisión de técnicas OPM	11
2.2.3. Interpretación de técnicas OPM	12
2.2.3.1. Diagrama de ojo	12
2.2.3.2. Factor de calidad Q	13
2.2.4. Cuantificación referencial de parámetros OPM	14
2.3. Sistemas radio sobre fibra (RoF)	15
2.3.1. Arquitectura de los sistemas RoF	15
2.3.2. Transmisor óptico para sistemas RoF	17
2.3.2.1. Heterodinación óptica	17
2.3.2.2. Modulación externa con modulador de electro absorción (EAM)	17
2.3.2.3. Modulación externa con modulador Mach-Zehnder (MZM)	17
2.3.3. Radio sobre fibra analógica (A-RoF)	18
2.3.3.1. Modulación de señales de radio frecuencia (RFoF)	19
2.3.3.2. Modulación de señales de frecuencia intermedia (IFoF)	19
2.3.4. Radio sobre fibra digital (D-RoF)	19
2.4. Modulación de datos en sistemas RoF	20
2.4.1. Modulación Analógica	20
2.4.1.1. Amplitud Modulada (AM)	20
2.4.1.2. Frecuencia Modulada (FM)	21
2.4.2. Modulación Digital	21
2.4.2.1. Modulación de amplitud en cuadratura (QAM)	21
2.4.2.2. Modulación por desplazamiento de fase en cuadratura (QPSK)	22
2.5. Interfaz común de radio pública (CPRI)	23
2.5.1. Interfaz Común de Radio Publica Evolucionada (eCPRI)	25
2.6. Red óptica pasiva (PON)	26
2.6.1. Red óptica pasiva con multiplexación por división de tiempo (TDM)	27
2.7. Tecnología FTTx	27
2.7.1. Arquitectura FTTx	28
2.7.1.1. Fibra hasta el hogar (FTTH)	28
2.7.1.2. Fibra hasta la cabina o armario (FTTC)	29
2.7.1.3. Fibra hasta el edificio (FTTB)	29
2.7.1.4. Fibra hasta el nodo (FTTN)	29



---

2.7.1.5. Comparativa de arquitecturas FTTx . . . . .	30
2.8. Simulador de redes de fibra óptica . . . . .	30
2.8.1. OptiSystem . . . . .	30
2.9. Conclusiones . . . . .	32
<b>3. Metodología de desarrollo y simulación . . . . .</b>	<b>34</b>
3.1. Diseño de la simulación mediante OptiSystem . . . . .	34
3.2. Modelo conceptual para el diseño . . . . .	35
3.2.1. Descripción del modelo de red GPON-FTTH . . . . .	38
3.2.2. Descripción del modelo RoF . . . . .	38
3.3. Definición del modelo de red en OptiSystem . . . . .	39
3.3.1. Diseño de la red FTTH . . . . .	40
3.3.1.1. Terminal de línea óptica (OLT) . . . . .	40
3.3.1.2. Red de distribución . . . . .	41
3.3.1.3. Unidad de red óptica (ONU) . . . . .	41
3.3.2. Simulación de tecnología RoF . . . . .	44
3.3.2.1. Transmisor RoF . . . . .	44
3.3.2.2. Canal de fibra óptica . . . . .	45
3.3.2.3. Receptor RoF . . . . .	46
3.3.3. Inserción de A-RoF en una red GPON . . . . .	50
3.3.3.1. IFoF sobre GPON . . . . .	52
3.3.3.2. RFoF sobre GPON . . . . .	57
3.3.4. Inserción de D-ROF en una red GPON . . . . .	58
3.4. Conclusiones . . . . .	59
<b>4. Análisis de resultados . . . . .</b>	<b>61</b>
4.1. Resultados de A-RoF en red GPON . . . . .	61
4.1.1. IFoF . . . . .	61
4.1.1.1. 4-QAM . . . . .	61
4.1.1.2. 16-QAM . . . . .	64
4.1.1.3. 64-QAM . . . . .	67
4.1.2. RFoF . . . . .	69
4.1.2.1. 4-QAM . . . . .	69
4.1.2.2. 16-QAM . . . . .	71
4.1.2.3. 64-QAM . . . . .	72
4.2. Resultados de D-RoF en red GPON . . . . .	74
4.3. Comparación de tecnología A-RoF & D-RoF . . . . .	75
4.3.1. Parámetro BER . . . . .	75
4.3.2. Parámetro de calidad Q . . . . .	78
4.3.3. Potencia RF de la señal recibida en BS . . . . .	80
4.4. Resumen . . . . .	82

---



---

<b>5. Simulación en redes empresariales</b>	<b>83</b>
5.1. Red empresarial 1 . . . . .	84
5.1.1. Caso 1 . . . . .	84
5.1.2. Caso 2 . . . . .	86
5.2. Red empresarial 2 . . . . .	89
5.2.1. Caso 1 . . . . .	89
5.2.2. Caso 2 . . . . .	91
5.2.3. Caso 3 . . . . .	93
5.3. Conclusiones . . . . .	93
<b>6. Conclusiones y Recomendaciones</b>	<b>95</b>
6.1. Conclusiones . . . . .	95
6.2. Recomendaciones . . . . .	96
6.3. Trabajos futuros . . . . .	96
<b>A. Apéndice 1</b>	<b>97</b>
A.1. Red GPON-RoF con SCM . . . . .	97
A.2. Red completa GPON-RoF . . . . .	99
A.3. Modulación analógica sobre RoF . . . . .	100
A.4. Modulación QPSK sobre RoF . . . . .	101
A.5. Red de transporte Empresa No. 2 . . . . .	102
<b>B. Apéndice 2</b>	<b>103</b>
B.1. Código empleado para la interpolación polinómica . . . . .	103
B.2. Configuración de barrido . . . . .	104
B.3. Generación de reportes en Optisystem . . . . .	104
B.4. Equipos RoF . . . . .	105
<b>Bibliografía</b>	<b>108</b>



---

---

## Índice de figuras

2.1. Red WDM-RoF en arquitectura estrella [1] . . . . .	8
2.2. Efectos lineales y no lineales existentes en la transmisión de datos en la fibra óptica [2] . . . . .	9
2.3. Clasificación de las técnicas OPM existentes . . . . .	11
2.4. Diagrama de ojo de una señal con 3 bits [3] . . . . .	12
2.5. Pulso generado en el diagrama de ojo [4] . . . . .	13
2.6. Comparativa de diagramas de ojo . . . . .	13
2.7. Relación entre función de densidad y BER [5] . . . . .	14
2.8. Medición de parámetros OPM . . . . .	14
2.9. Sistema radio sobre fibra [6] . . . . .	16
2.10. Arquitectura de un sistema radio sobre fibra [7] . . . . .	16
2.11. Diagrama esquemático de operación de un Mach-Zehnder Modulator (MZM) [7] . . . . .	18
2.12. Técnicas de enlace para Remote access unit (RAU) desde Central Office (CO) . . . . .	19
2.13. Principio de operación de D-RoF . . . . .	20
2.14. Modulación AM de una onda senoidal con índice de modulación igual a 1 . . . . .	21
2.15. Modulación FM de una onda senoidal con índice de modulación igual a 15 . . . . .	21
2.16. Diagrama de constelación para la modulación QAM . . . . .	22
2.17. Diagrama de constelación para Quadrature Phase-Shift Keying (QPSK) . . . . .	22
2.18. Definición del sistema y sus interfaces . . . . .	23
2.19. Descripción del protocolo CPRI . . . . .	24
2.20. Definición del sistema y la interfaz . . . . .	25
2.21. Descomposición de función a nivel de capa de transporte de red . . . . .	26
2.22. Diagrama de operación de una red Time Division Multiplexing (TDM)-Passive Optic Network (PON) [8] . . . . .	27
2.23. Tipos de FTTx . . . . .	28
2.24. Arquitectura FTTH . . . . .	28
2.25. Arquitectura FTTC y FTTB . . . . .	29
2.26. Arquitectura FTTN . . . . .	30
2.27. Pantalla inicial y componentes principales del simulador OptiSystem. Cabrera, Zambrano . . . . .	31
2.28. Elementos de transmisión óptica para simulación. Cabrera, Zambrano . . . . .	31
2.29. Ventana de propiedades de CW láser. Cabrera, Zambrano . . . . .	32
2.30. Simulación de una red de fibra óptica mediante OptiSystem. Cabrera, Zambrano . . . . .	32
3.1. Diagrama de flujo para diseño y evaluación de la red . . . . .	35
3.2. Escenario general del diseño . . . . .	36





3.3. Esquema de multiplexación de servicios . . . . .	36
3.4. Modelo general de OLT . . . . .	36
3.5. Modelo general del equipo RoF . . . . .	37
3.6. Modelo general de la recepción del sistema RoF . . . . .	37
3.7. Modelo conceptual planteado . . . . .	37
3.8. Red GPON en Optisystem . . . . .	40
3.9. Diagrama de bloques de OLT . . . . .	41
3.10. Red de distribución óptica con atenuaciones y splitters . . . . .	41
3.11. Elementos que componen un splitter 1:8 . . . . .	42
3.13. Transmisión y recepción de bits en la red GPON . . . . .	42
3.12. Diagrama de bloques de ONU . . . . .	43
3.14. Diagrama de ojo del enlace FTTH . . . . .	43
3.15. Sistema RoF simulado . . . . .	44
3.16. Subsistema que conforma un canal RoF . . . . .	45
3.17. Subsistema que conforma un canal WDM . . . . .	45
3.18. Medio de transmisión para el sistema RoF . . . . .	46
3.19. Proceso de recepción RoF . . . . .	46
3.20. Procesamiento de la señal para la obtención de bits . . . . .	47
3.21. Espectro óptico de los canales WDM . . . . .	48
3.22. Espectro eléctrico de los canales SCM . . . . .	48
3.23. Diagrama de constelación del sistema RoF . . . . .	49
3.24. Equipo transmisor de tecnología RoF . . . . .	50
3.25. GPON-RoF . . . . .	51
3.26. Salida de los servicios GPON y RoF . . . . .	51
3.27. Configuración de parámetro de simulación para modulador de cuadratura . . . . .	52
3.28. Espectro eléctrico en la salida del conversor óptico-eléctrico . . . . .	53
3.29. Sistema de bloques de estación base . . . . .	53
3.30. Diagrama de bloques del supra-convertidor . . . . .	53
3.31. Diagrama de bloques del receptor . . . . .	54
3.32. Diagrama de bloques del conversor descendente . . . . .	55
3.33. Diagrama de bloques del subsistema de carga . . . . .	55
3.34. Configuración de TDMA en el subsistema <a href="#">Uplink (UL)</a> . . . . .	56
3.35. Transmisor para RFoF . . . . .	57
3.36. Subsistema de descarga para RFoF . . . . .	57
3.37. Subsistema receptor de RFoF . . . . .	58
3.38. Digitalización de señal RF en el lado del transmisor . . . . .	58
3.39. Bits de la señal digitalizada . . . . .	59
3.40. Conversión digital-analógica en el lado del receptor . . . . .	59
4.1. Señales eléctricas y ópticas transmitidas desde CO . . . . .	62
4.2. Proceso de supra-conversión y conversión descendente . . . . .	63
4.3. Recuperación de bits y eficiencia de la red . . . . .	63
4.4. Señales enviadas en enlace de carga . . . . .	64
4.5. Diagrama de ojo del enlace de carga en red GPON . . . . .	64



4.6. Señales eléctricas y ópticas transmitidas desde CO . . . . .	65
4.7. Proceso de supra-conversión y conversión descendente . . . . .	65
4.8. Recuperación de bits y eficiencia de la red . . . . .	66
4.9. Señales enviadas en enlace de carga . . . . .	66
4.10. Señales eléctricas y ópticas transmitidas desde CO . . . . .	67
4.11. Proceso de supra-conversión y conversión descendente . . . . .	67
4.12. Recuperación de bits y eficiencia de la red . . . . .	68
4.13. Señales enviadas en enlace de carga . . . . .	68
4.14. Señales eléctricas y ópticas transmitidas desde CO . . . . .	69
4.15. Recuperación de bits y eficiencia de la red . . . . .	70
4.16. Señales enviadas en enlace de carga . . . . .	70
4.17. Señales eléctricas y ópticas transmitidas desde CO . . . . .	71
4.18. Recuperación de bits y eficiencia de la red . . . . .	71
4.19. Señales enviadas en enlace de carga . . . . .	72
4.20. Señales eléctricas y ópticas transmitidas desde CO . . . . .	73
4.21. Recuperación de bits y eficiencia de la red . . . . .	73
4.22. Señales enviadas en enlace de carga . . . . .	74
4.23. Respuesta de la red GPON ante D-RoF . . . . .	74
4.24. Comparación entre dispersión de los bits recibidos . . . . .	75
4.25. Error de bit en función de potencia óptica de señal IF recibida en BS para A-RoF . . . . .	76
4.26. Error de bit en función de potencia óptica de señal RF recibida en BS para A-RoF . . . . .	76
4.27. Error de bit en función de potencia óptica de señal IF recibida en BS para D-RoF . . . . .	77
4.28. Error de bit en función de potencia óptica de señal RF recibida en BS para D-RoF . . . . .	77
4.29. Comparación de BER entre A-RoF y D-RoF . . . . .	78
4.30. Factor de calidad Q del enlace de descarga . . . . .	79
4.31. Factor de calidad Q del enlace de carga . . . . .	79
4.32. Comparación del factor de calidad obtenido en enlace de descarga y carga para A-RoF y D-RoF . . . . .	80
4.33. Potencia RF de la señal en BS con A-RoF . . . . .	80
4.34. Potencia RF de la señal en BS con D-RoF . . . . .	81
5.1. Coeficiente de atenuación en función de la longitud de onda para la fibra G652.D . . . . .	84
5.2. Tasa de error de bit versus la potencia de la señal recibida para el caso 1 . . . . .	85
5.3. Resultados obtenidos de la red empresarial 1 caso 1 en enlace de descarga . . . . .	86
5.4. Resultados obtenidos de la red empresarial 1 caso 1 en enlace de carga . . . . .	86
5.5. Tasa de error de bit versus la potencia de la señal recibida para el caso de la red empresarial 1 caso 2 . . . . .	87
5.6. Resultados obtenidos de la red empresarial 1 caso 2 en enlace de descarga . . . . .	88
5.7. Resultados obtenidos de la red empresarial 1 caso 2 en enlace de carga . . . . .	88
5.8. Tasa de error de bit versus la potencia de la señal recibida para el caso 1 de la red empresarial 2 . . . . .	89
5.9. Resultados obtenidos de la red empresarial 2 caso 1 para enlace de descarga . . . . .	90
5.10. Resultados obtenidos de la red empresarial 2 caso 1 para enlace de carga . . . . .	90



---

5.11. Tasa de error de bit versus la potencia de la señal recibida para el caso 2 de la red empresarial 2 . . . . .	91
5.12. Resultados obtenidos de la red empresarial 2 caso 2 para el enlace de descarga . . . . .	92
5.13. Resultados obtenidos de la red empresarial 2 caso 2 para enlace de carga . . . . .	92
5.14. Tasa de error de bit versus la potencia de la señal recibida para el caso 3 de la red empresarial 2 . . . . .	93
A.1. Señales eléctricas y ópticas transmitidas de CO . . . . .	97
A.2. Información obtenida en el receptor . . . . .	98
A.3. Modulación QPSK . . . . .	98
A.4. Sistema completo para la simulación . . . . .	99
A.5. Red para simulación de modulación AM . . . . .	100
A.6. Red para simulación de modulación FM . . . . .	100
A.7. Resultados de modulaciones analógicas . . . . .	101
A.8. Red de transporte de 12 Km . . . . .	102
B.1. Configuración de múltiples iteraciones . . . . .	104
B.2. Ventana de reportes. Instrucciones para graficar y exportar datos. . . . .	105
B.3. Equipos Tx y RX para transmisión y recepción de RFoF de 0,01GHz-18GHz. Fuente:rfoptic.com . . . . .	105
B.4. Equipos Tx y RX para transmisión y recepción bidireccional de RFoF de 0,01GHz-5GHz. Fuente:www.rfoptic.com . . . . .	106
B.5. Equipos Tx y RX para transmisión y recepción bidireccional de RFoF de 0,01GHz-5GHz. Fuente:www.smw.se . . . . .	106
B.6. Equipos RFoF indoor chasis DEV 7113 Fuente:www.dev-systemtechnik.com . . . . .	107
B.7. Tarjetas RFoF de enlace en banda L- DEV 7232 Fuente:www.dev-systemtechnik.com . . . . .	107



---

---

## Índice de tablas

2.1. Degradaciones y eventualidades existentes en la fibra óptica conforme ITU-T G.697 . . .	10
2.2. Correlación entre degradaciones ópticas y parámetros de monitoreo . . . . .	10
2.3. Arquitectura FTTx en función de distancia hacia el usuario . . . . .	30
3.1. Parámetros de simulación para el sistema GPON . . . . .	40
3.2. Parámetros de simulación para el sistema RoF . . . . .	44
3.3. Parámetros de simulación para el sistema GPON-ARoF . . . . .	50
3.4. Parámetros de simulación para el sistema GPON-DRoF . . . . .	58
4.1. Comparativa de resultados obtenidos . . . . .	81
4.2. Resultados obtenidos para el factor Q [dB]. . . . .	81
5.1. Redes empresariales analizadas . . . . .	83
5.2. Parámetros para la red del caso 1 . . . . .	85
5.3. Parámetros para la red del caso 2 . . . . .	87
5.4. Parámetros para el primer caso de la red empresarial 2 . . . . .	89
5.5. Parámetros para del caso 2 de la red empresarial 2 . . . . .	91



---

---

## Cláusula de Propiedad Intelectual

Yo, Iván Fernando Cabrera Cochancela, autor de la tesis “Análisis del rendimiento y eficiencia de un sistema Radio-over-Fiber sobre una red PON mediante Optisystem.”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 14 de septiembre de 2021

---

Iván Fernando Cabrera Cochancela  
010592806-3



---

---

## Cláusula de Propiedad Intelectual

Yo, José Andrés Zambrano Jaramillo, autor de la tesis “Análisis del rendimiento y eficiencia de un sistema Radio-over-Fiber sobre una red PON mediante Optisystem.”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 14 de septiembre de 2021

---

**José Andrés Zambrano Jaramillo**  
070385070-1



---

---

## Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Yo, Iván Fernando Cabrera Cochancela en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación “Análisis del rendimiento y eficiencia de un sistema Radio-over-Fiber sobre una red PON mediante Optisystem.”, de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos. Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 14 de septiembre de 2021

---

Iván Fernando Cabrera Cochancela

010592806-3




---

---

## Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Yo, José Andrés Zambrano Jaramillo en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación “Análisis del rendimiento y eficiencia de un sistema Radio-over-Fiber sobre una red PON mediante Optisystem.”, de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos. Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 14 de septiembre de 2021



---

**José Andrés Zambrano Jaramillo**  
070385070-1





---

## Certifico

Que el presente proyecto de tesis: *Análisis del rendimiento y eficiencia de un sistema Radio-over-Fiber sobre una red PON mediante Optisystem.*, fue dirigido y revisado por mi persona.

---

**Ing. Alcides Araujo Pacheco**  
**Director**



---

## Dedicatoria

Este trabajo se lo dedico a toda mi familia quienes me ha apoyado incondicionalmente a lo largo de toda mi carrera. Especialmente, a mi madre Sonia, mi abuela Luz y a mis hermanos que me han acompañado y motivado a lo largo de mi vida para poder mejorar en mi formación.

**Iván Cabrera Cochancela**



---

## Dedicatoria

Este trabajo se lo dedico a mi madre, Dayse, quien con su apoyo, amor incondicional, fortaleza, sabiduría y perseverancia ha forjado el hombre que hoy soy; impregnando en mi siempre lo mejor e incentivándome a ir siempre un paso más adelante y a nunca rendirme ante cualquier adversidad. Siempre siendo mi guía y motor, aún en tiempos difíciles.

**José Zambrano Jaramillo**



---

## Agradecimientos

Doy gracias a toda mi familia que me ha apoyado y aportado sus conocimientos y experiencias para mejorar mi crecimiento como persona; de igual forma agradecer a todos los amigos y los maestros con una mención especial al ingeniero Alcides Araujo quien nos ha guiado en esta tesis y nos ha aportado mucho dentro y fuera de las aulas.

**Iván Cabrera Cochancela**



---

---

## Agradecimientos

### A mi familia

Mi padre Víctor, mis hermanos Marcelo y Alessandro, mi abuela Maclovia, mis primos, mis tíos Mary, Fabián, Alba, Ruth y sus cónyuges, por el apoyo brindado durante toda mi vida y los sabios consejos que marcaron mi rumbo. A todos aquellos quienes de manera desinteresada aportaron con sus conocimientos y experiencias a un joven que comenzaba a recorrer el camino de la vida. A mi enamorada Erika y su familia, por la confianza y el cariño depositado en mi. Les agradezco de todo corazón!

### A mis maestros

A todos aquellos que estuvieron presentes durante mi formación universitaria y supieron guiarme por el sendero del aprendizaje. Pero en especial al Ingeniero Alcides Araujo Pacheco por el apoyo, motivación y tiempo brindado en la elaboración de esta tesis.

**José Zambrano Jaramillo**



---

---

## Abreviaciones y Acrónimos

**3GPP** 3rd Generation Partnership Project. 24

**5GPPP** 5G Infrastructure Public Private Partnership. 24

**A-RoF** Analog-RoF. 5, 6, 18–20, 52, 58, 60, 61, 75, 79, 82, 96

**ADC** Analog-to-Digital Converter. 58

**AM** Amplitude Modulation. 20, 61

**ASK** Amplitude Shift Keying. 21

**ATM** Asynchronous Transfer Mode. 7

**BBU** BaseBand Unit. 6, 23, 25

**BER** Bit Error Rate. 3, 5, 8, 10–12, 14, 46, 61, 75, 77, 78, 82–84, 87, 89, 91, 93–95

**BPF** Band-pass filter. 17, 46, 52, 54, 58

**BPF** Low-pass filter. 44

**BPON** Broadband Passive Optical Network. 30

**BS** Base Station. 2, 3, 15–17, 23, 32, 34, 37–39, 50–52, 54, 57, 62, 64, 69, 75, 78, 82, 95

**BW** Bandwidth. 7, 8, 52

**CATV** Community Antenna Television. 3, 16

**CM** Control and Management. 24

**CO** Central Office. 3, 16, 18–20, 50, 51, 56, 59, 75, 97

**CPRI** Common Public Radio Interface. 6, 23–25

**CWDM** Coarse Wavelength Division Multiplexing. 7, 8

**D-RoF** Digital-RoF. 5, 19, 20, 58, 75, 77–80, 82, 95

**DAC** Digital-to-Analog Converter. 59

**DC** Down-Converter. 62

**DL** Downlink. 5, 61, 71, 74, 79, 85, 87, 89, 91

**DML** Directly Modulated Lasers. 5

**DPSK** Differential Phase Shift Keying. 4

**DSLAM** Digital Subscriber Line Access Multiplexer. 29

**DSP** Digital Signal Processor. 20

**DTV** Digital Television. 6, 95

**DWDM** Dense Wavelength Division Multiplexing. 6–8

**E/O** Electrical to Optic. 62

**eCPRI** Enhanced Common Public Radio Interface. 25, 26



- EDFA** Erbium Doped Fiber Amplifier. 5
- EML** Electro-absorption Modulated Laser. 5
- eNB** Enhanced Next Generation Node B. 26
- EPON** Ethernet Passive Optical Network. 30
- eRE** eCPRI Radio Equipment. 25, 26
- eREC** eCPRI Radio Equipment Control. 25, 26
- EVM** Error vector magnitude. 75, 96
- 
- FBG** Fiber Bragg Grating. 4
- Fi-Wi** Fiber-Wireless. 2
- FM** Frequency Modulation. 20, 21, 61
- FTTB** Fiber-to-the-building. 29
- FTTC** Fiber-to-the-curb. 29
- FTTH** Fiber-to-the-home. 2, 3, 7, 34–36, 38–40, 42, 50
- FTTN** Fiber-to-the-node. 29
- FTTx** Fiber to the x. 27, 28
- FWM** Four Wave Mixing. 9, 10
- 
- gNB** Next Generation Node B. 26
- GPON** Gigabit Passive Optic Network. 2, 3, 27, 30, 34, 40, 41, 50, 51, 59–62, 64, 69, 70, 73, 78, 83–85, 87, 89, 91–93, 95
- 
- HDLC** High level Data Link Control. 24
- HFC** Hybrid fiber-coaxial. 16
- 
- IF** Intermediate Frequency. 19, 52, 54, 60, 77
- IFoF** Intermediate Frequency Over Fiber. 5, 6, 52, 57, 60–62, 64, 69, 75, 78, 80, 82
- IP** Internet Protocol. 7
- ISI** Inter-symbol Interference. 12, 43, 96
- ISP** Internet Service Provider. 8
- 
- LTE** Long Term Evolution. 1
- 
- MAC** Media Access Control. 26, 27
- MFN** Mobile Fronthaul Network. 17
- MIMO** Multiple Input Multiple Output. 5, 26
- MMW** Millimeter Wave. 2, 15, 16
- MZM** Mach-Zehnder Modulator. 17, 18, 20, 36, 44, 62, 69
- 
- NAP** Network Access Point. 38
- NRZ** Non return to zero. 40
- 
- OCDM** Optical Code Division Multiplexing. 26
- OCDMA** Optical Code Division Multiple Access. 30
- ODN** Optical Distribution Network. 40, 51, 59, 69, 75, 80, 82, 94, 97
- OFDM** Orthogonal Frequency Division Multiplexing. 26, 36, 44, 46
- OLT** Optical Line Terminal. 27, 36, 38, 40, 41



- ONT** Optical Network Terminal. 27, 38
- ONUs** Optical network units. 27, 40, 59
- OPM** Optical Monitoring Parameter. 3, 8, 11, 35
- OSNR** Optical Signal-to-Noise Ratio. 8, 10, 12, 14
- P2M** Point-to-multipoint. 26–28
- PDCP** Packet Data Convergence Protocol. 26
- PDH** Plesiochronous Digital Hierarchy. 7
- PMD** Polarization Mode Dispersion. 8, 10
- PON** Passive Optic Network. 3, 26, 27
- PRBS** Pseudo-random Bit Sequence. 40, 44
- PSK** Phase Shift Keying. 21, 22
- QAM** Quadrature Amplitude Modulation. 4, 5, 21, 44–46, 61, 65, 69, 72, 75, 87, 101
- QPSK** Quadrature Phase-Shift Keying. 22, 45, 61, 101
- RAU** Remote access unit. 16–20
- RCC** Remote Cluster Controller. 26
- RE** Radio Equipment. 23
- REC** Radio Equipment Control. 23
- RF** Radio Frequency. 2, 18, 19, 26, 44, 50, 52, 58, 60, 69, 77, 93
- RFoF** Radio-Frequency over Fiber. 19, 57, 61, 70, 75, 78, 80, 82
- RLC** Radio Link Control. 26
- RN** Remote Node. 3, 16, 27
- RoF** Radio-over-Fiber. 2–7, 15–17, 20, 30, 32, 34–36, 39, 40, 49–52, 59, 61, 78, 83–85, 87, 89, 91–95, 101
- RRH** Remote Radio Head. 6, 23
- RRU** Remote Radio Unit. 25
- SAP** Service Access Points. 25
- SCM** Subcarrier Multiplexing. 20, 44, 49, 50, 97
- SDH** Synchronous Digital Hierarchy. 7
- SNR** Signal-to-Noise Ratio. 13, 14
- SPM** Self Phase Modulation. 9, 10
- TDM** Time Division Multiplexing. 26, 27
- TDMA** Time Division Multiple Access. 54
- THz** Tera-Hertz. 16
- UC** Up-Converter. 16, 62, 67
- UE** User Equipment. 51, 54, 57
- UL** Uplink. 5, 56, 68, 72–74, 78, 79, 85, 87, 89
- VDSL** Very high-bit-rate Digital Subscriber Line. 29
- WDM** Wavelength Division Multiplexing. 4–8, 26, 44, 45, 96
- WiMAX** Worldwide Interoperability for Microwave Access. 3, 20





**WLAN** Wireless Local Area Networks. [3](#)

**XPM** Cross Phase Modulation. [9](#), [10](#)

CAPÍTULO  
**1**

---

## Introducción

Este capítulo presenta la identificación del problema, justificación y los objetivos del presente proyecto.

### 1.1. Identificación del problema

Con el desarrollo tecnológico en telecomunicaciones a partir de la creación de Internet, hoy en día la comunicación entre usuarios en distintas locaciones es una realidad. De igual manera, el crecimiento exponencial de aplicaciones y servicios que facilitan dicha comunicación se han vuelto parte importante en el día a día de cualquier internauta. Quien con solo poseer un teléfono móvil tiene a su disposición todas las herramientas necesarias.

Sin embargo, una mejor calidad de comunicación en los diferentes servicios de transmisión, implica un aumento del ancho de banda y reducción de retardo entregado al usuario. Aunque si bien, esto se puede lograr en conexiones cableadas, para el usuario es necesario que se lo entreguen en cualquier lugar y accedendo desde su dispositivo móvil. Por lo cual, las compañías prestadoras de servicio móvil han evolucionado sus redes permitiendo entregar una alta transmisión de datos mediante acceso inalámbrico.

En el transcurso de la última década el mundo entero ha registrado cambios significativos en comunicaciones móviles, siendo la red celular 4G la que se encuentra extensamente desplegada en la actualidad y la sociedad en general se encuentra a la expectativa de la implementación de 5G. El eslogan de presentación de esta nueva generación celular es que *cualquier persona, pueda realizar lo que quiera, a cualquier hora sin importar el lugar* [9]. Para lograr esto es necesario que los sistemas inalámbricos sean capaces de soportar un alto requerimiento de ancho de banda, sin saturar el espectro radioeléctrico y entregando un servicio de calidad. Además de que el enlace de alimentación de la radio base soporte dichas capacidades. Esto se ve reflejado en el despliegue de tecnología para 4G-LTE, donde se aprecia un mayor número de radio bases, menor radio de cobertura y *backhaul* con enlaces de fibra óptica.

Por otro lado, la principal limitante en comunicaciones móviles es la pérdida existente por el medio



de transmisión inalámbrico (siendo superior a 10 dB/Km), y el limitado ancho de banda accesible. Razón necesaria para investigar nuevos escenarios de sistemas inalámbricos que operen a frecuencias que ofrezcan mayor capacidad de ancho de banda. La solución se encuentra en la banda de onda milimétrica “*Millimeter Wave (MMW)*”, que comprende el rango entre 30 y 300 GHz, y permite obtener anchos de bandas en el orden de los GHz. Por lo cual, países como Corea del Sur, China y Estados Unidos emplean la frecuencia de 60 GHz para servicios inalámbricos, siendo motivo de estudio a nivel mundial. De todas formas, se presentan ciertos criterios que deben tenerse en cuenta, ya que para la implementación de **MMW** es necesario aumentar la potencia de transmisión debido a las pérdidas en el medio inalámbrico lo que aumenta el costo de las estaciones base “*Base Station (BS)*”, debido a los equipos electrónicos necesarios. Algunos de estos inconvenientes tienen solución mediante la implementación de la tecnología radio sobre fibra “*Radio-over-Fiber (RoF)*”, la misma que promete ser clave para las nuevas generaciones de redes de acceso [10].

Por otro lado, se tienen las redes ópticas pasivas - fibra hasta el hogar “*GPON-FTTH*”, ampliamente desplegadas alrededor del mundo, brindando acceso de banda ancha, las cuales satisfacen las necesidades que los usuarios demandan. Para brindar este servicio se emplean las longitudes de onda de 1490 nm, con una atenuación promedio de 0.25 dB/km, para el enlace de descarga, y la longitud de onda de 1310 nm para el enlace de carga, con una atenuación promedio de 0.35 dB/Km.

5G es la red móvil que tendrá que asumir el reto de entregar altas tasas de datos, a un retardo menor a 1 ms y con un gran ancho de banda. Uno de los principales inconvenientes que debe enfrentar 5G es la cantidad de enlaces *backhaul* necesarios para lograr conexión con un gran número de radio-bases, lo que significaría un incremento en costo CAPEX y OPEX, debido al despliegue de redes y equipos. Por lo cual, la principal estrategia es cambiar el *backhaul* por *fronthaul*, transmitiendo señales de radio a través de la fibra y multiplexando señales de diferentes radio-bases.

Hoy en día parece claro que las futuras redes de acceso de banda ancha aprovecharán las respectivas fortalezas de las tecnologías ópticas e inalámbricas, fusionándolas de manera inteligente para crear redes fibra-inalámbricas “*Fi-Wi*” preparadas para el futuro, fortaleciendo la sociedad de la información y disminuyendo la brecha digital. Al combinar la capacidad de las redes de fibra óptica con la ubicuidad y movilidad de las redes inalámbricas, las redes **Fi-Wi** forman una plataforma poderosa para el soporte y la creación de aplicaciones y servicios emergentes y futuros. Las redes **Fi-Wi** prometen cambiar la forma en que vivimos y trabajamos reemplazando los desplazamientos por el teletrabajo. Esto no solo brinda más tiempo para actividades profesionales y personales para beneficio corporativo y personal, sino que también ayuda a reducir el consumo de combustible y proteger el medio ambiente, temas que son cada vez más importantes en nuestras vidas.

**RoF** se presenta como una nueva tecnología donde se transmite señales de radio frecuencia sobre la fibra óptica, a una longitud de onda de 1550 nm, con una atenuación promedio de 0.2 dB/km, la cual permite obtener resultados eficientes para los servicios inalámbricos de banda ancha. Aunque la transmisión de señales de radio frecuencia “*Radio Frequency (RF)*”, a través de fibra se realiza también en otras aplicaciones, como redes de televisión por cable y estaciones satelitales, el término **RoF** se usa exclusivamente en conexión con los sistemas de comunicación **Fi-Wi**.

Ecuador cuenta con operadores que brindan servicios de telefonía móvil y de banda ancha, teniendo redes dedicadas para cada servicio. Ante el advenimiento de 5G y debido a la necesidad de una masificación de **Base Station (BS)**, es necesario cuestionarse si aún es óptimo mantener esta estructura separada de servicios o resulta mejor establecer una convergencia de servicios en una sola infraestructura.



Para lo cual, es necesario realizar un estudio que permita determinar la factibilidad existente al converger ambos servicios, contemplando el rendimiento y la eficiencia de la red FTTH ante la inserción de RoF. En otras palabras, se emplearía la red FTTH como *fronthaul* para el servicio móvil 5G.

## 1.2. Justificación

Los sistemas RoF son usados principalmente para transmitir señales de radio desde la oficina central “*Central Office (CO)*” hacia los nodos remotos “*Remote Node (RN)*” tales como nodos celulares, Worldwide Interoperability for Microwave Access (WiMAX), Wireless Local Area Networks (WLAN), Community Antenna Television (CATV) y otros servicios inalámbricos que opera mediante sistemas de radio.

El crecimiento de las redes de acceso de banda ancha se ha evidenciado en muchas ciudades del mundo. En la ciudad de Cuenca se ha incrementado la cobertura de servicios FTTH mediante redes GPON desplegadas en la ciudad. Considerando este gran despliegue en la ciudad y tomando en cuenta que para futuras redes móviles 5G se necesitaría un nuevo despliegue de fibra óptica desde las BS a la CO se plantea el uso de estas redes ya desplegadas, las cuales mediante RoF permitirían minorar costos y tiempo para implementar 5G, brindar un servicio de banda ancha inalámbrico y orientando a la convergencia de servicios en una misma infraestructura [11].

El uso de RoF en redes PON permite el uso de ventanas no utilizadas en los servicios ya brindados evitando de esta forma cualquier tipo de interferencia, además de la baja atenuación en 1550 nm, inmunidad a las interferencia electromagnéticas y gran capacidad de transmisión. De igual forma, simplifica notablemente la complejidad de las BS ya que al tratarse de señales de radio, solo se debe realizar una conversión óptico-eléctrica para su procesamiento. De igual manera, su implementación no inhibe el servicio FTTH, ya que mediante el uso de multiplexores se colocan ambos servicios en una misma fibra.

## 1.3. Alcance

En el presente trabajo se propone analizar un sistema RoF sobre una red FTTH considerando valores teóricos de atenuaciones, dispersiones y varias longitudes de fibra desde el último nivel de división de la señal (*Splitter*) hasta la BS, para mostrar su comportamiento con diferentes esquemas de modulación [1].

De igual manera, se propone simular la implementación de RoF sobre una red PON mediante los datos de operación brindados por un operador local, a esta red PON se le caracterizará en diferentes escenarios para conocer la respuesta que tendría en caso de una implementación real. En cada escenario se usan además diferentes esquemas de modulación, adicionalmente se caracterizan el comportamiento de diferentes fibras comerciales para conocer su respuesta frente a un potencial uso de RoF [12].

Mediante estas simulaciones se pretende analizar el rendimiento y eficiencia del enlace después de incorporar RoF en la red GPON. Con base en los parámetros de monitoreo de desempeño óptico “*OPM*”, los mismos que son diagramas de ojo, curvas de error de bit “*BER*” y factor Q, para el caso del rendimiento. Para el caso de la eficiencia, se considera la potencia recibida en la BS; estos valores se basan en la recomendación de la ITU G.697 [13]. Los resultados se validan mediante la comparación del comportamiento de la red FTTH puro con el comportamiento de la red RoF-GPON, dando de esta



forma un punto de referencia con el cual entender las características de RoF. De igual manera se toma como referencia los valores obtenidos en [7].

Para la verificación de la hipótesis se utilizará el software Optisystem 17.0, el mismo que está disponible con licencias de prueba por 3 meses o en versiones previas las cuales tienen licencias libres, aunque carecen de algunas características que las nuevas versiones poseen.

## 1.4. Objetivos

### 1.4.1. Objetivo general

Análisis del comportamiento de calidad de RoF implementado sobre enlaces de fibra óptica punto a punto y redes PON utilizando el simulador Optisystem.

### 1.4.2. Objetivos específicos

- Analizar el comportamiento y eficiencia de una red ante la inserción de sistemas RoF.
- Simulación de diferentes esquemas de modulación para RoF.
- Simulación de una red óptica real que se encuentre en operación en un operador local.
- Validación de análisis y simulaciones realizadas.
- Analizar los equipos y las características de las redes de fibra óptica desplegadas en una red real para sugerir propuestas de mejoras para la utilización de RoF.
- Proponer posibles aplicaciones RoF dentro de una red PON para otros diferentes tipos de servicios.

## 1.5. Estado del arte

En esta sección se destacan trabajos relacionados con el tema de investigación los cuales han sido desarrollados durante años recientes, entre estos trabajos tenemos:

- **Análisis del rendimiento de transmisión usando WDM en radio sobre fibra para redes ópticas de larga distancia de próxima generación [14]:** este trabajo presenta un análisis de sistemas RoF con técnicas “*Wavelength Division Multiplexing (WDM)*”, modulación por desplazamiento por diferencia de fase “*Differential Phase Shift Keying (DPSK)*” y modulación por amplitud de cuadratura “*Quadrature Amplitude Modulation (QAM)*”, con las cuales los autores logran aminorar los efectos de no linealidad y la dispersión cromática. Las simulaciones realizadas tienen como parámetros un láser que trabaja a 1550 nm con una potencia de entre 0 y 25 dBm. Una vez se analizan estos casos los autores obtienen un mejor resultado al utilizar en cada canal de envío una rejilla de fibra de Bragg “*Fiber Bragg Grating (FBG)*” conjuntamente con una modulación DPSK en comparación al utilizar la modulación QAM la cual presenta mejoras en la dispersión cromática y los efectos de no linealidad; en comparación de potencia de llegada necesaria ambos tipos de modulaciones tienen una potencia alrededor de los -23 dBm es decir su comportamiento energético es similar.[14]
- **Diseño y análisis de rendimiento de los esquemas WDM para sistemas de radio sobre fibra con diferentes pérdidas de propagación de fibra [12]:** en este artículo los autores realizan simulaciones utilizando Optisystem para analizar los efectos que tiene WDM

en redes **RoF**, para ello se plantean diferentes longitudes de enlace óptico (5, 10, 20, 50 y 60 km) con un láser que trabaja en la ventada de 1552,5 nm con un ancho de línea de 10 MHz; la potencia del láser va de -15 dBm a 15 dBm aumentando en pasos de 5 dBm en cada ciclo. Los resultados dados por la tasa de error de bit "*Bit Error Rate (BER)*" y el diagrama de ojo muestra que el sistema planteado a 20 km tiene una calidad de recepción óptima mientras que a 60 km su calidad disminuye considerablemente. Adicionalmente, al colocar un amplificador de fibra dopado con Erblio "*Erbium Doped Fiber Amplifier (EDFA)*" la señal recibida mejora incluso en el caso del enlace con el mayor alcance.[12] Este artículo conjuntamente con el anterior permite considerar para la simulación propuesta el uso de **WDM** y **QAM**, y además, tener una buena recepción incluso en los casos de enlaces de gran longitud.

- **Implementación de redes fronthaul móviles basadas en RoF mediante el uso de un modulador láser directo y modulador láser de electro-absorción para sistemas de comunicación inalámbricos 5G [15]:** en este artículo se investiga las modulaciones de alto nivel necesarias para la transmisión en sistemas móviles 5G, se analiza el comportamiento de los moduladores láser directos "*Directly Modulated Lasers (DML)*" los cuales presentan una distorsión debido al chirrido adiabático y permiten un alcance bajo comparado con los moduladores láser de electro-absorción "*Electro-absortion Modulated Laser (EML)*" los cuales no poseen mucha distorsión pero se limitan en su potencia de salida, los investigadores de Sur Corea al alcanzar una potencia de salida de hasta 7 dBm en los **EML** logran obtener un alcance de 20 km para 24 sub-portadoras OFDM de 100 MHz de ancho de banda moduladas en 64-QAM.[15]. Mediante este artículo se entiende el funcionamiento de los moduladores láser y se puede escoger el láser más idóneo para el caso propuesto.
- **Red de acceso por radio basada en RoF para sistemas de comunicaciones móviles 5G en ondas milimétricas de 28 GHz [16]:** este artículo presenta los resultados obtenidos en la implementación de una red de acceso en PyeongChang mediante un sistema de Frecuencia Intermedia sobre Fibra "*Intermediate Frequency Over Fiber (IFoF)*" y la utilización de un sistema de distribución de antenas, al realizar un sistema de múltiples entradas y múltiples salidas "*Multiple Input Multiple Output (MIMO)*"  $2 \times 2$  donde se utilizó las dos bandas de Downlink **DL** 1550 nm y 1570 nm obteniendo un *throughput* de 1 Gbps, para *Uplink UL* se usó las bandas 1510 nm y 1530 nm obteniendo un *throughput* de 200 Mbps. Los investigadores al cambiar a un **MIMO**  $4 \times 4$  y con las mismas especificaciones anteriores logran una mejora de *throughput* en **DL** de hasta 9 Gbps con un usuario estático y para un usuario en movimiento se alcanza 5 Gbps [16]. Con los resultados obtenidos en este artículo se puede tener claro el uso de una modulación en frecuencia intermedia y la posibilidad de irradiar a una mayor frecuencia desde las antenas a los usuarios.
- **Interfaces D-RoF y A-RoF en un fronthaul totalmente óptico para un sistemas móvil 5G [17]:** en este artículo se presenta las configuraciones para la coexistencia de radio sobre fibra digital "*Digital-RoF (D-RoF)*" y el radio sobre fibra analógico "*Analog-RoF (A-RoF)*". En el artículo se considera un núcleo de nueva generación para las redes móviles 5G la cual tiene una comunicación entre nodos mediante **D-RoF**, lo cual además del paso de información permitiría el control de los elementos. Por otro lado la utilización de **A-RoF** se establece en el *fronthaul* y *midhaul* donde sus características permiten el uso de antenas distribuidas. La información viajaría por la red con un control según lo establecido por la interfaz común de radio pública



“*Common Public Radio Interface (CPRI)*”. De esta forma se podría separar las unidades de banda base “*BaseBand Unit (BBU)*” de las cabezas de radio remota “*Remote Radio Head (RRH)*” las cuales tendrían un enlace óptico mediante *A-RoF* hasta llegar a los nodos del núcleo donde la información se digitaliza. Según las simulaciones realizadas por los autores se proveen resultados óptimos al utilizar técnicas *WDM* con frecuencias menores a 10 GHz ya que para frecuencias más altas los autores recomiendan la utilización de *IFoF* con técnicas de multiplexación por división de longitud de onda densa “*Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM)*” de esta forma se logra aminorar las pérdidas conforme la frecuencia de la señal aumenta [17]. Las nuevas redes móviles plantean un nuevo desafío debido a la gran cantidad de información que se pretende transportar por lo que un sistema puramente óptico tanto en el núcleo del sistema móvil como en el *fronthaul* se perfila como la mejor solución a estos problemas.

- **Aplicación de sistemas RoF para el servicio de televisión digital:** este artículo habla de una posible aplicación para *RoF* no basada en las redes móviles sino en brindar un servicio de Televisión Digital “*Digital Television (DTV)*”. Para ello se utiliza el mismo despliegue de red de fibra óptica ya dada en una zona y se envía la señal de televisión por medio de *RoF*, al llegar al usuario se decodifica y es enviada a los televisores. Esta aplicación fue probada por investigadores en Indonesia en dos ciudades, en donde, dependiendo de la distancia desde la central de operaciones y el cliente la calidad del vídeo varía; esto da a conocer nuevas aplicaciones que las empresas pueden llegar a implementar.[18]
- **Nano radio y aplicaciones RoF:** en este artículo se plantea el uso de frecuencias en el orden de los THz con la cual se aumenta el ancho de banda. Estas señales se proponen enviarlas por una red *RoF* con la cual se puede llegar a armar sistemas de Ad-Hoc dando nuevas aplicaciones. Para lograr estas frecuencias se utiliza un sistemas de anillos denominado PANDA y se propone un sistema *DWDM* con el cual poder dividir las señales enviadas por fibra óptica de esta forma se logra el envío de señales de hasta 50 THz por fibra óptica mediante *RoF*[19]. Con este artículo se constata el uso de frecuencias mayores para la transmisión de señales en redes móviles.

CAPÍTULO  
**2**

---

## Aspectos teóricos y técnicos

A continuación, se detallan los aspectos teóricos y técnicos tanto para los sistemas [FTTH](#) y [RoF](#). De igual manera se presentan los parámetros de monitoreo de desempeño óptico, en los cuales se basa el rendimiento de la red.

### 2.1. Aspectos técnicos de un sistema de comunicación óptico

Actualmente un sistema de comunicación óptico se encuentra basado en una técnica de multiplexación [WDM](#), para multiplexar los datos de descarga y carga. [WDM](#) permite combinar múltiples señales, en este caso ópticas, que se encuentran en diferentes longitudes de ondas ( $\lambda$ ) provenientes de diferentes fuentes láser, y transmitir las mediante un solo enlace de fibra óptica dentro del [Bandwidth \(BW\)](#) disponible. Los componentes empleados son: un multiplexor en el lado transmisor y un de-multiplexor en el lado del receptor, los mismos que son dependientes de la longitud de onda ( $\lambda$ ) de las señales que se están transmitiendo, tal como se observa en la figura [2.1](#). Es importante mencionar que en la actualidad los sistemas [WDM](#) operan en la banda de 1550 nm debido a que para ese grupo de longitudes de onda se encuentran desarrollados amplificadores ópticos.

[WDM](#) permite transportar en distintas portadoras ópticas diferentes protocolos, pudiéndose tener [Asynchronous Transfer Mode \(ATM\)](#), [Plesiochronous Digital Hierarchy \(PDH\)](#), [Internet Protocol \(IP\)](#), [Synchronous Digital Hierarchy \(SDH\)](#), etc [\[10\]](#). La multiplexación [WDM](#) se puede clasificar en [Coarse Wavelength Division Multiplexing \(CWDM\)](#) y [Dense Wavelength Division Multiplexing \(DWDM\)](#).

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

Se conoce como [CWDM](#) a la multiplexación que permite 18 longitudes de onda entre 1270 nm y 1610 nm con una separación entre canales de 20 nm (2.5 THz). El amplio espaciamiento existente entre los canales permite usar transmisores y filtros de poca precisión, pero también impide utilizar eficientemente el ancho de banda existente en la fibra.



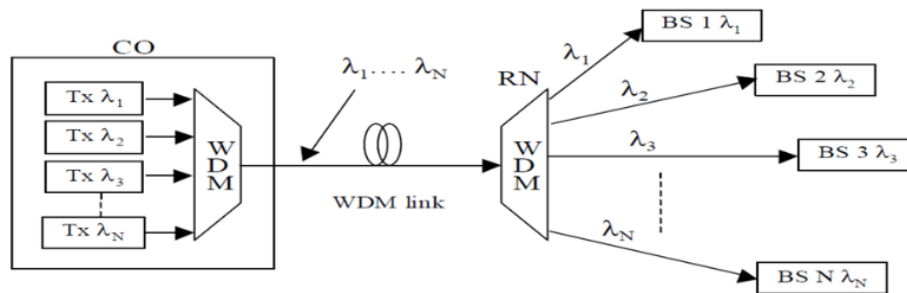


Figura 2.1: Red WDM-RoF en arquitectura estrella [1]

**CWDM** es principalmente utilizado para transmisión de datos a bajas velocidades en redes de corto y medio alcance, aplicaciones no amplificadas y parte de redes de acceso de un [Internet Service Provider \(ISP\)](#) [10].

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

**DWDM** se considera a sistemas **WDM** con más de cuatro longitudes de onda y separación entre canales de mínimo 0.8 nm. Permite una escalabilidad en redes ya desplegadas, permitiendo un mayor uso de **BW** cambiando solo los componentes terminales.

Los sistemas **DWDM** proporcionan canales con separación de menos de 1 nm dentro del **BW** del amplificador. **DWDM** se usa para redes metropolitanas y de largo alcance [10].

## 2.2. Fundamentos para el monitoreo de canal óptico

Existen parámetros dentro de la fibra óptica, ya sean los de caracterización de la fibra o los resultantes en una transmisión de datos. La recomendación ITU-T G.697 [13] clasifica estos parámetros en dos categorías: degradación óptica y parámetros de monitoreo óptico “**OPM**”.

Dentro de las degradaciones ópticas se consideran: dispersión cromática, dispersión por modo de polarización “**Polarization Mode Dispersion (PMD)**”, diafonía, atenuación, jitter, etc; y dentro de los parámetros de monitoreo: longitud de onda del canal, “**OSNR**”, potencia del canal, potencia total en la fibra y factor Q.

Se relacionan los parámetros longitud de onda del canal, potencia del canal, **OSNR** y potencia total en la fibra como *características analógicas* de la señal óptica; mientras que **BER**, jitter, dispersión cromática y factor Q como *características digitales*.

### 2.2.1. Degradaciones ópticas y parámetros de monitoreo óptico

Existen efectos que degradan la calidad de la señal óptica dentro de la fibra, afectando la transmisión y limitando su desempeño. Estos efectos se dan debido a la propia fabricación y componentes que conforman la fibra y son:

- **Atenuación.** - pérdida de potencia de la señal a medida que viaja a través de la fibra óptica.
- **Dispersión.** - ensanchamiento del pulso de luz conforme aumenta la distancia de transmisión.

- **Efectos no lineales.** - efectos causados por la interacción de la luz con el material de la fibra, provocando cambios en la onda.

Los efectos antes mencionados se pueden observar en la figura 2.2. Dentro de la categoría *No lineal*, los efectos paramétricos son: automodulación de fase “*Self Phase Modulation (SPM)*”, modulación de fase cruzada “*Cross Phase Modulation (XPM)*” y mezcla de cuatro ondas “*Four Wave Mixing (FWM)*”. Un monitoreo periódico permite mantener un alto índice de confiabilidad en la red y los equipos, permitiendo reparaciones inmediatas y disminuyendo el tiempo fuera de servicio de la red.

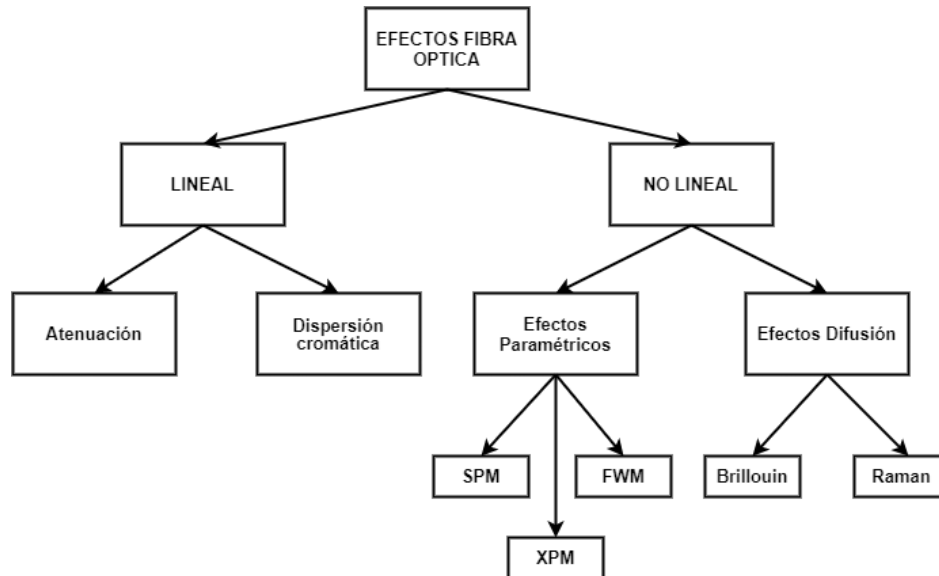


Figura 2.2: Efectos lineales y no lineales existentes en la transmisión de datos en la fibra óptica [2]

### 2.2.1.1. Degradaciones ópticas

Conforme lo establece la recomendación G.697 [13], en la tabla 2.1 se muestran las principales degradaciones existentes en los sistemas ópticos que afectan la transmisión de señales y su eventualidad dentro de los mismos.

Es importante mencionar que si bien se puede tener una eventualidad baja, todos los parámetros son considerados críticos para degradar la señal óptica. Por lo cual, dentro de lo antes mencionada se considera la eventualidad como:

- **Baja.** - cuando la probabilidad de ocurrencia es de un evento en 10 años.
- **Media.** - cuando la probabilidad de ocurrencia es de un evento en 1 año.
- **Alta.** - cuando la probabilidad de ocurrencia es de 10 eventos en aproximadamente 1 año.

Cuando ocurre el evento, el sistema sufre una penalidad de X dB, considerándose como 3 dB una degradación significativa. Dentro del presente trabajo, se consideran las siguientes degradaciones: dispersión cromática, diafonía y atenuación.

### 2.2.1.2. Parámetros de monitoreo óptico

En la actualidad, los sistemas ópticos pueden medir los parámetros existentes en una red, empleando diversas tecnologías o equipos, los mismos que son:

Tabla 2.1: Degradaciones y eventualidades existentes en la fibra óptica conforme ITU-T G.697

Degradación	Eventualidad	Descripción
Atenuación	Elevada	
Variaciones de la potencia del canal óptico debido a variaciones de ganancia	Elevada	
Desviación de la longitud de onda del valor nominal	Elevada	Rec. ITU-T G.692
PMD	Media	Apéndice II/G.663
FWM	Media	Apéndice II/G.663
Ruido de emisión espontánea amplificada en amplificación óptica	Media	Apéndice II/G.663
Dispersión cromática	Media	Apéndice II/G.663
Pendiente de dispersión cromática	Media	ITU-T G.652, G.653, G.655
Reflexiones	Media	Apéndice II/G.663
Ruido de láser	Media	
Diafonía entre canales	Media	ITU-T 39
Diafonía interferométrica	Media	ITU-T 39
XPM	Baja	Apéndice II/G.663
SPM	Baja	Apéndice II/G.663
Difusión estimulada de Brillouin	Baja	Apéndice II/G.650.2, Apéndice II/G.663
Difusión estimulada de Raman	Baja	Apéndice II/G.663

Tabla 2.2: Correlación entre degradaciones ópticas y parámetros de monitoreo

Degradación   Parámetro	Potencia total	Potencia de canal	Longitud de onda del canal	OSNR	Factor Q
Variación de atenuación	✓	✓		✓	✓
Desviación de la longitud de onda del valor nominal		✓	✓	✓	✓
Variación de la potencia del canal debido a variaciones de ganancia		✓		✓	✓

- Longitud de onda del canal
- Potencia de canal
- Factor de Calidad Q
- Potencia total de la fibra
- Razón señal óptica a ruido “**Optical Signal-to-Noise Ratio (OSNR)**”

Para el presente trabajo, se consideran los siguientes parámetros de monitoreo: longitud de onda del canal, potencia del canal y potencia total en la fibra.

### 2.2.1.3. Correlación entre degradaciones ópticas y parámetros de monitoreo

Es correcto considerar que existe una correlación entre los parámetros de degradación y monitoreo [20]. Por lo cual, en la tabla 2.2 se presenta dicha correlación, teniendo en cuenta que para el presente trabajo, los resultados se basan principalmente en la potencia del canal, BER y factor Q.

Es importante mencionar que las variaciones de atenuación y las variaciones de potencia del canal óptico debido a variaciones de ganancia aún no se pueden determinar. Sin embargo, existe una relación directa entre la desviación de la frecuencia del valor nominal y la longitud del canal, ya que la precisión en la medición se ve afectada por la desviación de la frecuencia máxima del canal [13].

## 2.2.2. Técnicas de monitoreo de desempeño óptico (OPM) para sistemas de detección directa

El descubrimiento de nuevas técnicas que permitan monitorear la señal óptica ha sido un campo importante de investigación, ya que es necesario para la reconfiguración y descubrimiento de nuevos canales que permitan una mejor eficiencia de la red. Los sistemas de detección directa emplean fotodetectores para detectar la intensidad de la señal óptica y transformarla al dominio eléctrico.

Las técnicas de monitoreo de desempeño óptico “*Optical Monitoring Parameter (OPM)*” desarrolladas son preferiblemente utilizadas en sistemas de detección directa simple, sin embargo, un efecto adverso es la precisión de la estimación debido a la falta de información [21].

### 2.2.2.1. Revisión de técnicas OPM

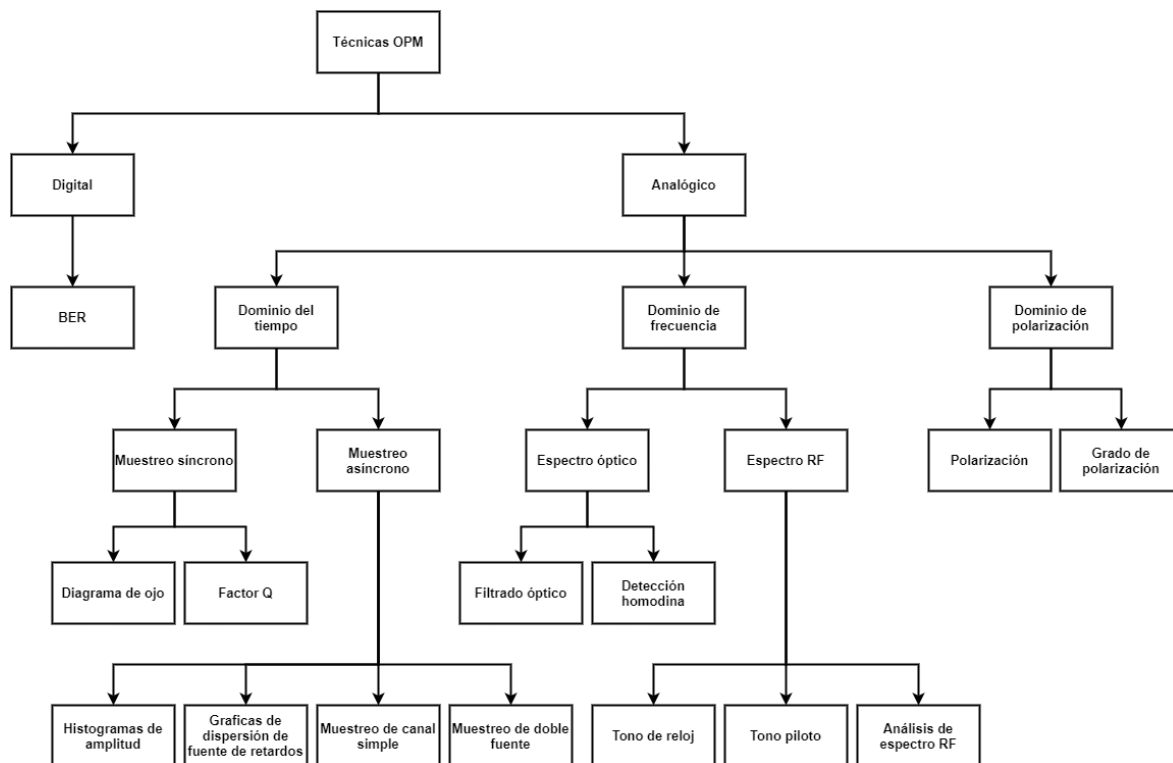


Figura 2.3: Clasificación de las técnicas OPM existentes

En la figura 2.3 se muestran la clasificación de las técnicas OPM, las mismas que pueden dividirse en digitales y analógicas [21].

La técnica digital permite obtener la información digital contenida en el dominio eléctrico, en este caso el BER. BER permite monitorear la degradación completa de la calidad de la señal debido a las

deficiencia de la red. Dentro de la técnicas analógicas, se monitorean las características de las ondas analógicas para extraer información de las deficiencia del canal. Estas se subdividen en los respectivos dominios en el cual extraen la información, siendo: tiempo, frecuencia y polarización.

Dentro del dominio del tiempo, se tiene el muestreo síncrono y asíncrono. El diagrama de ojo es una técnica popular basada en muestreo síncrono, la cual permite reflejar cualitativamente todas las degradaciones de la calidad de la señal.

De igual manera, el factor Q es otra técnica de monitoreo basada en muestreo síncrono, la cual es ampliamente utilizada debido a su fuerte relación con el BER.

### 2.2.3. Interpretación de técnicas OPM

#### 2.2.3.1. Diagrama de ojo

El diagrama de ojo es usado en las telecomunicaciones digitales como una forma de analizar un enlace en donde se presenta la superposición de las diferentes combinaciones de 1 y 0 de la señal enviada; por ejemplo, en la figura 2.4 se muestra la gráfica del diagrama de ojo que se obtendría al enviar 3 bits.

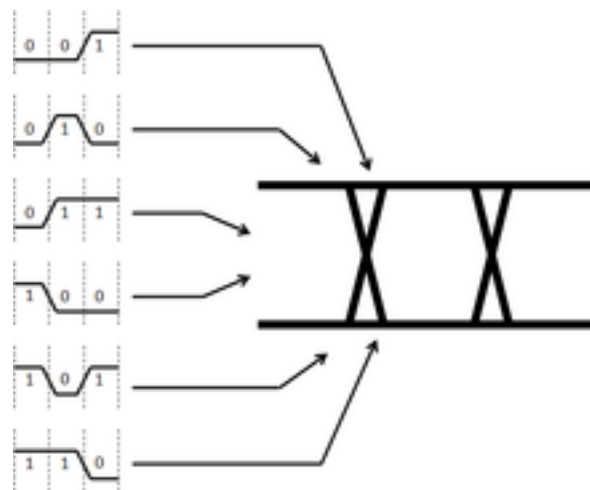


Figura 2.4: Diagrama de ojo de una señal con 3 bits [3]

En las gráficas de diagramas de ojo se puede analizar el nivel de potencia, los desfases y el ruido presente en la onda que se transmite en el enlace. Al ver la representación de una onda en el diagrama de ojo como se observa en la figura 2.5 se aprecia que con este tipo de gráfica se puede analizar el tiempo de subida de la señal, el tiempo de bajada, el sobre impulso, ruido y el jitter los cuales son parámetros importantes al momento de saber la calidad de un enlace digital [3].

Para una mejor comprensión de este parámetro de monitoreo, se realiza una comparación entre dos diagramas de ojo, uno con un OSNR = 30 dB y otro con OSNR = 8 dB, los mismos que se pueden observar en la figura 2.6. Se puede apreciar que cuando existe un buen rendimiento de la red, las curvas del diagrama de ojo se encuentran bien definidas (2.6a), mientras que cuando existe interferencia inter-símbolo “*Inter-symbol Interference (ISI)*” en el enlace, las curvas del diagrama de ojo se encuentran dispersas y desordenadas (2.6b).

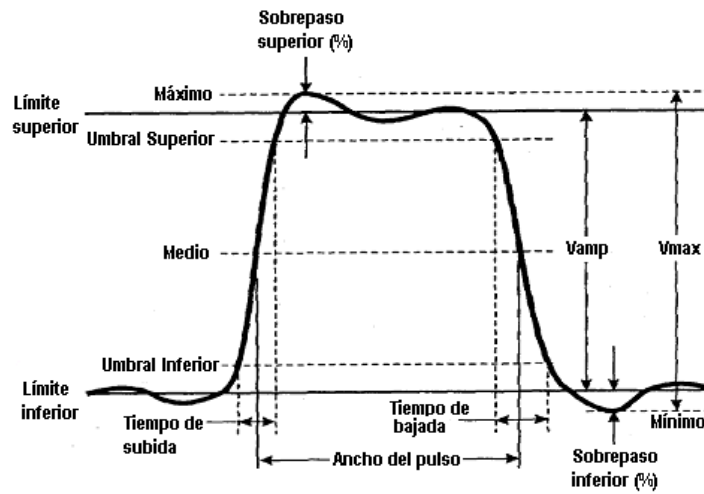
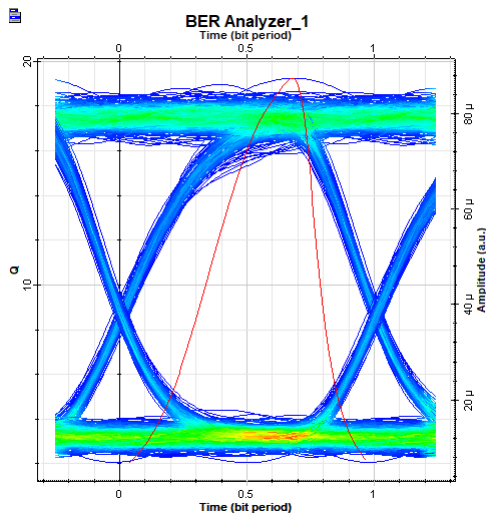
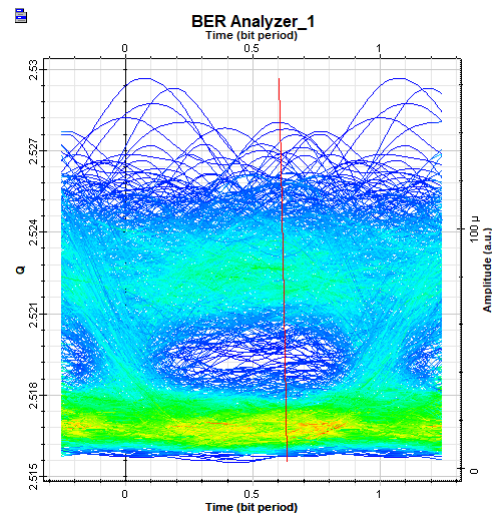


Figura 2.5: Pulso generado en el diagrama de ojo [4]



(a) Diagrama de ojo de red con OSNR = 30 dB



(b) Diagrama de ojo de red con OSNR = 8 dB

Figura 2.6: Comparativa de diagramas de ojo

### 2.2.3.2. Factor de calidad Q

El factor Q se define, para una señal de transmisión digital, como **Signal-to-Noise Ratio (SNR)** en el circuito de decisión del receptor, y se encuentra determinado por la siguiente fórmula:

$$Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_1 - \sigma_0}$$

donde  $\mu_0$  y  $\mu_1$  son los niveles medios de tensión de los niveles 0 y 1.  $\sigma_0$  y  $\sigma_1$  son las desviaciones típicas de la distribución de ruido en los niveles 0 y 1; esto se puede observar en la figura 2.7.

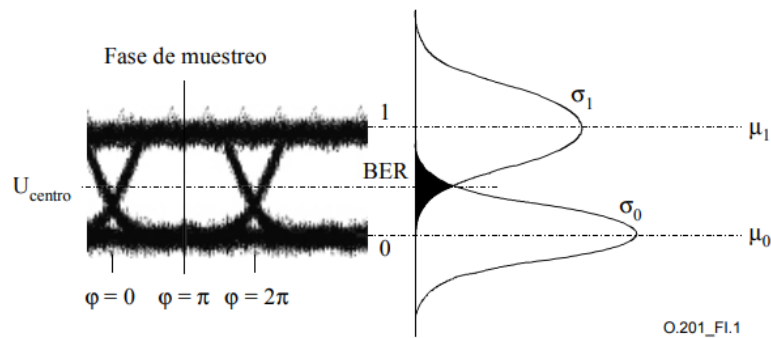


Figura 2.7: Relación entre función de densidad y BER [5]

La relación SNR muestra todos los deterioros que los defectos ópticos y eléctricos producen en el punto examinado dentro de la red óptica. Se puede utilizar el método del factor Q para obtener una evaluación de la calidad de funcionamiento que se puede esperar cuando la red está en servicio [5].

Así mismo, esta información se la puede obtener mediante un instrumento de medición o también observando el respectivo diagrama de ojo del enlace. En la figura 2.8a se puede observar los valores de los parámetros medidos del diagrama mostrado en la figura 2.6a, se aprecia que tiene un factor  $Q \approx 19$  y un  $BER = 8,79 \times 10^{-81}$ . Es importante mencionar que el eje de las ordenadas del diagrama de ojo, corresponde al factor Q, donde la altura que alcanza la curva indica su valor. Para el caso de la figura 2.6b, los resultados son visualizados en la figura 2.8b, donde se aprecia que existe una disminución del valor de los parámetros, factor  $Q \approx 2,53$  y un  $BER = 5,3 \times 10^{-3}$ , comprobándose el deterioro del enlace y la relación existente entre BER y factor Q.

Analysis	
Max. Q Factor	18.9976
Min. BER	8.7924e-081
Eye Height	5.59341e-005
Threshold	3.93815e-005
Decision Inst.	0.671875

(a) Parámetros medidos del enlace con OSNR = 30 dB

Analysis	
Max. Q Factor	2.52966
Min. BER	0.00530091
Eye Height	-1.22566e-005
Threshold	4.36437e-005
Decision Inst.	0.601563

(b) Parámetros medidos del enlace con OSNR = 8 dB

Figura 2.8: Medición de parámetros OPM

#### 2.2.4. Cuantificación referencial de parámetros OPM

Conforme lo sugerido en [22], el rango de valores a considerar para el parámetro BER se cataloga como lo siguiente:

- $BER > 1 \times 10^{-3}$ , desempeño malo
- $BER = 1 \times 10^{-3}$ , desempeño regular
- $BER < 1 \times 10^{-3}$ , desempeño bueno

Con base en estos valores y aprovechando la relación existente, se realizó un barrido con diferentes OSNR para establecer el rango de desempeño para el factor Q, obteniendo:

- $Q < 3$  dB, desempeño malo



- $Q = 3$  dB, desempeño regular
- $Q > 3$  dB, desempeño bueno

## 2.3. Sistemas radio sobre fibra (RoF)

Actualmente, la conexión inalámbrica permanente en los equipos de los usuarios es un hecho, sin embargo, aún no son lo suficientemente rápidas como ellos lo desearían. Cada día el usuario necesita más ancho de banda en su celular y no solo cobertura, tal es el claro ejemplo del auge de transmisiones en vivo que se vive en la actualidad. Los usuarios desean visualizar su contenido gráfico en buena calidad y sin retardo, lo que es un problema para la red telefónica actual.

Las operadoras móviles con sus equipos actualizados no logran ofrecer dicho requerimiento, y no es debido a la falta de ingeniería en sus redes, sino debido a la propia saturación de los canales existentes en sus redes de transporte. Ethernet ofrece hasta 1 Gb (1 GbE) para implementación en sistemas inalámbricos y se espera la implementación de 10 GbE [23]. La solución para transmisiones inalámbricas a velocidades de múltiples Gbps se encuentra en la banda **MMW**, que opera en el rango de frecuencias entre 30 y 300 GHz. En esta banda se dispone de anchos de bandas en el rango de GHz, como es el ejemplo de la banda de 60 GHz que se encuentra en investigación por el grupo IEEE 802.15.3c, cuya frecuencia se plantea en el uso de transmisiones de corto alcance, de hasta 10 m, con velocidades superiores a 1 Gbps [24].

Sin embargo, desarrollar sistemas que trabajen en la banda **MMW** presentan ciertos inconvenientes que deben ser solucionados. Uno de ellos es el alto costo de los circuitos electrónicos utilizados en las **BS**, los mismos que aumentan debido al corto alcance y esto aumentaría significativamente el costo operativo. De igual manera, al tratarse de frecuencias altas, se debe aumentar la potencia de transmisión para contrarrestar las pérdidas por el medio inalámbrico. **RoF** se presenta como una solución para algunos de los inconvenientes presentados, siendo la opción más prometedora para las redes de acceso. La idea es transmitir estas señales **MMW** sobre la fibra óptica, aprovechando la inmunidad a las interferencias, alta capacidad de transmisión, longitud de onda de operación y baja atenuación, significativamente mas baja que la existente en el cobre y aire [10].

El motivo principal del uso de **RoF** es por la capacidad de soportar grandes anchos de banda y la disminución en el precio de las **BS**. Todo el procesamiento (modulación, demodulación, codificación y enrutamiento) se realizaría en la oficina central, la misma que podrá manejar varias **BS**, a través de la fibra óptica [25].

A continuación, se presentan los beneficios de los sistemas **RoF**:

- Bajas pérdidas de atenuación
- Inmunidad a interferencias electromagnéticas
- Alta fiabilidad y bajo costo de mantenimiento
- Capacidad escalable y alta calidad de señales
- Reducción de consumo energético
- Múltiples servicios en una sola fibra

### 2.3.1. Arquitectura de los sistemas RoF

Se conoce como **RoF** al sistema que involucra la transmisión de señales de radio a través de enlaces de fibra óptica, donde la señal de radio modula una onda de luz. En las últimas décadas se han



investigado técnicas con el fin de encontrar aplicaciones en el campo del procesamiento de señales ópticas, (convertidores ópticos analógico-digital, filtros fotónicos-microondas), arreglo de antenas para *beamforming*, sistemas de generación de MMW y Tera-Hertz (THz), para aplicaciones como redes de acceso inalámbricas de banda ancha, procesamiento de radar, radio-astronomía entre otras. El término RoF no es relativamente nuevo, ya que es una evolución de la tecnología fibra-coaxial híbrida “*Hybrid fiber-coaxial (HFC)*” donde se empleaban como medio de transmisión el cable coaxial y la fibra óptica para enviar canales analógicos y digitales desde una CO a varios usuarios distribuidos geográficamente, brindando el servicio de televisión por cable “*CATV*” [6]. Cuando se tienen varias señales de distintas BS, un dispositivo óptico pasivo (*splitter*), se encarga de dividir la señal, tal como se muestra en la figura 2.9.

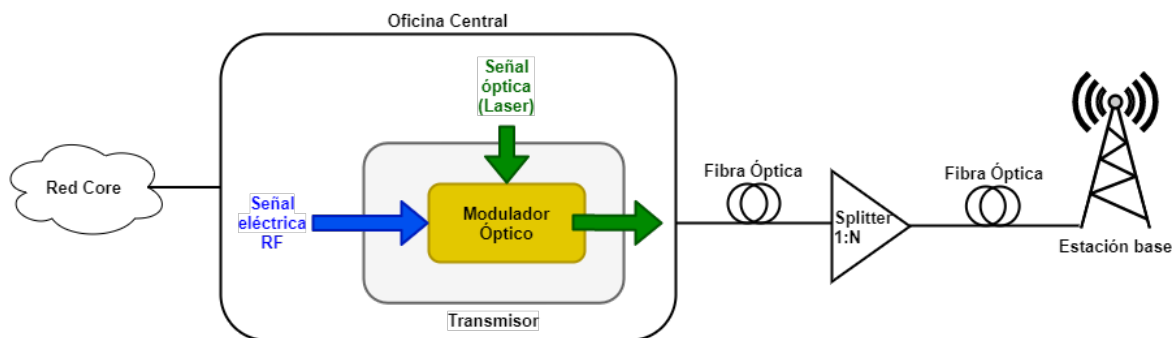


Figura 2.9: Sistema radio sobre fibra [6]

Un sistema RoF consta de 3 elementos: transmisor, enlace óptico y receptor. Expresando este sistema en diagrama de bloques se obtendría lo visualizado en la figura 2.10. Inicialmente la señal de banda base es convertida a una señal de microondas mediante el supraconvertidor “*Up-Converter (UC)*”, luego la transforma a señal óptica para ser transmitida por el enlace de fibra hacia el RN o receptor; donde se puede transmitir directamente de forma inalámbrica [7]. En el lado del receptor, se debe realizar el proceso de conversión descendente de RF para su posterior procesamiento.

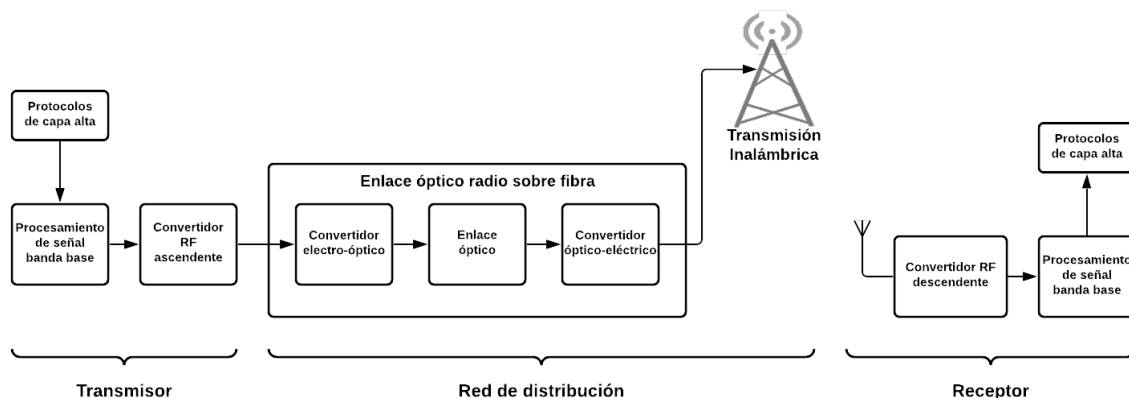


Figura 2.10: Arquitectura de un sistema radio sobre fibra [7]

Al transmitirse señales de radio frecuencia sobre la fibra hacia los RAU, todo el procesamiento de las mismas se puede realizar en la CO, por lo cual se obtendría una centralización de los servicios;



además de una transparencia en técnicas de modulación y soporte a distintos formatos digitales e inalámbricos, esto se explica con más detalle más adelante. Esto se interpreta como una disminución de inversión en la RAU ya que esta se simplificarían al grado de necesitar convertidores óptico-eléctricos, eléctricos-ópticos, filtros pasa banda “*Band-pass filter (BPF)*” y amplificadores de potencia para su operación. Conjuntamente se tiene disminución de gastos en mantenimiento y soporte; además de la flexibilidad en convergencia de servicios que ofrece RoF [6].

### 2.3.2. Transmisor óptico para sistemas RoF

El transmisor óptico es el encargado de convertir la señal eléctrica al dominio óptico, para su posterior transporte hacia las BS mediante el enlace de fibra. Este punto es clave en el sistema, ya que permite disminuir costos y reduce la complejidad de la configuración. Sin embargo, existe ciertos desafíos que deben enfrentarse al implementar estos sistemas, debido a que es importante considerar la respuesta en frecuencia del componente modulador. Por ejemplo, el modulador Mach-Zehnder, posee buena respuesta para sistemas por debajo de 40 GHz, por lo cual, la comunidad científica se encuentra en búsqueda de nuevos métodos para la generación de señales ópticas que no representen un aumento en su costo ni aumenten el consumo energético.

Existen métodos para la generación de las portadoras ópticas milimétricas, pudiendo ser mediante osciladores locales o mediante la técnica heterodina óptica. Sin embargo, la eficiencia de los osciladores se ve reducida conforme aumenta la frecuencia de la portadora, por lo cual la técnica heterodina es la mejor opción, ya que ofrece mayor precisión y bajo ruido.

A continuación, se procede a detallar los métodos más conocidos para la generación de ondas, conforme [10]:

#### 2.3.2.1. Heterodinación óptica

Esta técnica consiste en generar a la salida del fotodetector un pulso eléctrico con una frecuencia similar a la longitud de onda existente entre la separación de las dos señales ópticas diferente longitud de onda incidentes. Si bien es capaz de operar con frecuencias en el rango de THz, no es eficiente debido a que el ancho de banda se limita por el fotodetector. Además, la señal eléctrica a la salida del fotodetector se vería afectada por ruido de fase si ambas portadoras ópticas incidentes no poseen correlación.

#### 2.3.2.2. Modulación externa con modulador de electro absorción (EAM)

Esta técnica de modulación se basa en el uso de materiales capaces de absorber la radiación en función del campo eléctrico que se aplica en sus extremos. Este efecto de control de potencia y absorción de radiación se conoce en materiales semiconductores como Franz-Keldysh o efecto Stark.

Estos moduladores presentan varias ventajas, sin embargo, posee características no lineales propias del componente que hacen necesario el uso de técnicas complejas de linealización.

#### 2.3.2.3. Modulación externa con modulador Mach-Zehnder (MZM)

MZM es el modulador más conocido y usado debido a que se ha comprobado su uso eficaz en Mobile Fronthaul Network (MFN) basados en RoF para sistemas 5G [15].

En la figura 2.11 se observa el diagrama de un MZM, el mismo que opera dividiendo la señal en dos guías de onda, donde una de estas guías se modula por la conducción de electrodos [26]. MZM se usa para controlar la amplitud de la onda óptica mediante los dos brazos de guía de onda (interferómetro) y aplicándole un voltaje dc (bias) a estos brazos. Se induce un cambio de fase en la onda a través del brazo, por lo cual la señal óptica que viaja por ambos brazos del interferómetro se re-combinan en la salida del MZM y la diferencia de fase entre ambas señales se convierte en una señal óptica de amplitud modulada [27].

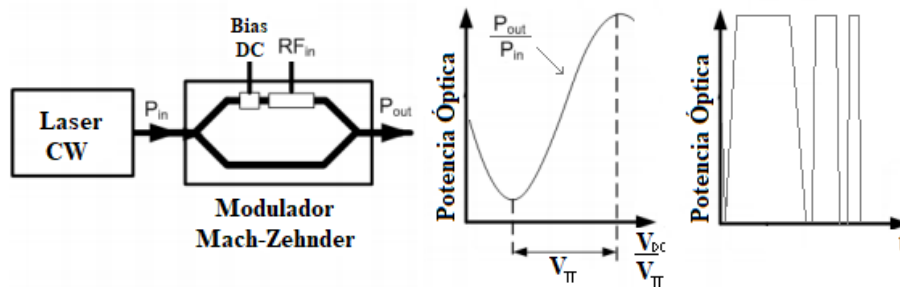


Figura 2.11: Diagrama esquemático de operación de un MZM [7]

Generalmente se encuentran fabricados de Niobato de Litio ( $\text{LiNbO}_3$ ) o de Arseniuro de Galio ( $\text{GaAs}$ ), MZM supone una gran ventaja ya que puede generar señales libre de *chirp*, característica crítica que permite mitigar los efectos de la dispersión cromática. Además, ofrece una buena linealidad, permitiendo alcanzar altas tasas de transmisión [28].

El principal motivo del uso de Niobato de Litio ( $\text{LiNbO}_3$ ) es que este cristal puede variar su índice de refracción dependiendo del campo eléctrico al que se encuentra sometido, permitiendo manipular la señal óptica [29].

Una vez comprendido el funcionamiento del transmisor óptico, es importante mencionar que dependiendo del tipo de señal Radio Frequency (RF) inyectada al modulador, se puede tener radio sobre fibra analógica o radio sobre fibra digital.

### 2.3.3. Radio sobre fibra analógica (A-RoF)

El advenimiento de la nueva generación celular, considerando una masiva colocación de antenas para conformar pico o femto celdas y ofrecer altas tasas de datos, son motivos necesarios buscar soluciones amigables para el operador. Es ahí donde entra A-RoF, ya que debido a su principio de funcionamiento permite disminuir notablemente el costo de cada RAU porque evita el uso de osciladores, pero eleva el costo de la circuitería encargada de manipular la frecuencia. Esto se debe a que parte del dispositivo de radio es transferido a la CO donde puede ser supervisado por un operador y puede funcionar para distintas RAU.

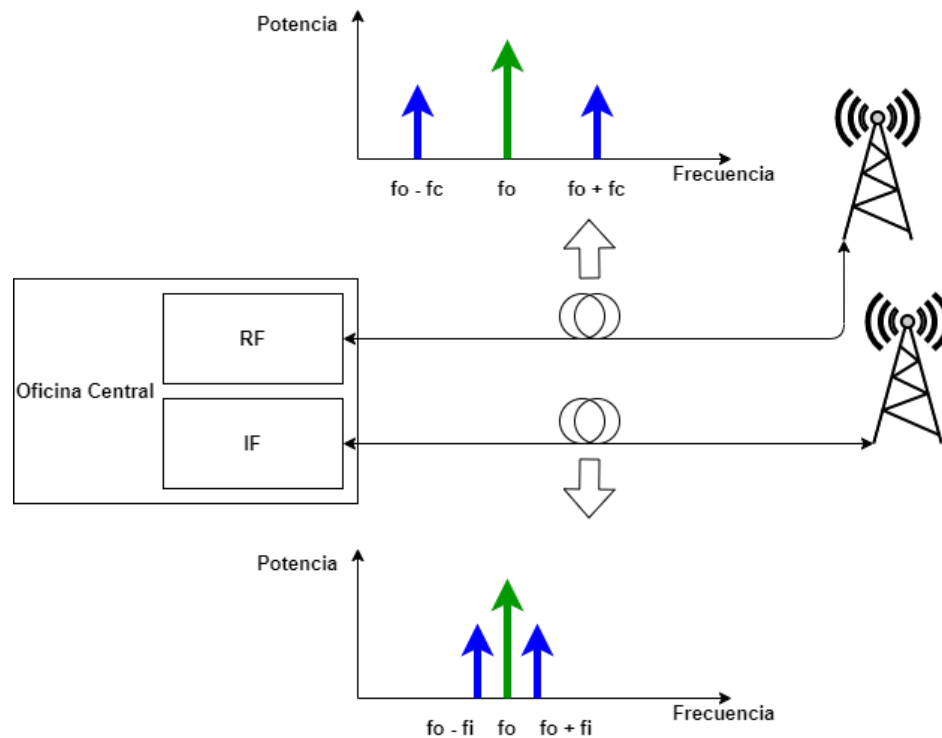


Figura 2.12: Técnicas de enlace para RAU desde CO

En la figura 2.12 se puede observar las técnicas de transporte para A-RoF donde  $f_0$  hace referencia a una portadora óptica,  $f_c$  y  $f_i$  a señales dependientes de la frecuencia, RF o Intermediate Frequency (IF), respectivamente.

### 2.3.3.1. Modulación de señales de radio frecuencia (RFoF)

Esta técnica consiste en transportar la señal de radio modulada que se va a irradiar directamente desde CO hasta RAU, lo cual se conoce como Radio-Frequency over Fiber (RFoF). Esta opción es la que mejor relación eficiencia-costo ofrece ya que elimina el uso de osciladores en cada RAU.

### 2.3.3.2. Modulación de señales de frecuencia intermedia (IFoF)

La segunda técnica radica en enviar la señal pre-modulada a una frecuencia intermedia, la cual dependerá del sistema inalámbrico empleado, desde CO hasta RAU. Si con la frecuencia  $f_i$  se puede brindar el servicio inalámbrico, no necesitaría más dispositivos. Sin embargo, si se necesita irradiar a una frecuencia más alta, se necesitará de un oscilador que permita realizar un conversión; lo cual aumentará el costo de la RAU. De todas formas, ofrece una disminución en el costo del circuito procesador de la frecuencia intermedia [30].

### 2.3.4. Radio sobre fibra digital (D-RoF)

D-RoF se presenta como una alternativa a A-RoF gracias a los grandes avances tecnológicos en cuanto a circuitería electrónica. Uno de los principales motivos es eliminar el comportamiento

impredecible de las señales A-RoF debido a las no-linealidades de los dispositivos de transmisión, los cuales se presentan más notoriamente cuando se aplica [Subcarrier Multiplexing \(SCM\)](#) al sistema.

El objetivo de D-RoF es realizar un procesamiento digital de la señal mediante un [Digital Signal Processor \(DSP\)](#) antes de inyectarla al modulador MZM en la CO, con lo cual se elimina el uso de osciladores y a su vez disminuye notoriamente el costo de cada RAU.

En la figura 2.13 se puede observar el sistema de funcionamiento de D-RoF. La información a transmitir es ingresada al bloque modulador, posteriormente se realiza un proceso de digitalización y filtrado antes de ingresar al modulador. En el lado del receptor, el fotodetector es el encargado de convertir la señal óptica a eléctrica, se realiza una conversión digital-analógica y se filtra para ser transmitida de manera inalámbrica.

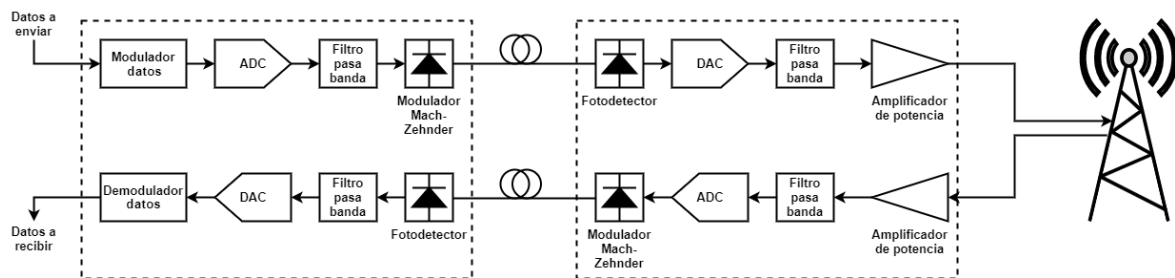


Figura 2.13: Principio de operación de D-RoF

Sin embargo, no todo son ventajas con D-RoF, ya que si bien mejora la eficiencia de la red, su aplicación es complicada o costosa. Esto se debe al teorema de Nyquist, el cual indica que para digitalizar una señal analógica, ésta debe ser muestreada al menos al doble de la frecuencia de la señal. Es decir, si para WiMAX 802.16a, la señal de radio opera a 2.475 GHz, se debe muestrear al menos a 5 GHz para poder ser transmitida mediante D-RoF. Aunque si bien, si puede hacer, el costo del circuito electrónico hoy en día es sumamente elevado [30].

## 2.4. Modulación de datos en sistemas RoF

Dentro de los sistemas RoF, se puede emplear distintos formatos de modulación para la información que se desea transmitir, pudiendo ser analógicos y digitales.

### 2.4.1. Modulación Analógica

Dentro del apartado de modulación analógica, se detallan las principales: [Amplitude Modulation \(AM\)](#) y [Frequency Modulation \(FM\)](#).

#### 2.4.1.1. Amplitud Modulada (AM)

AM es una técnica de modulación en la cual la amplitud de la señal portadora varía conforme a la amplitud de la señal de mensaje y esta variación depende del índice de modulación designado. Generalmente es usada en transmisión de onda de radio y de TV en forma de *broadcast*. En la figura 2.14 se observa la modulación de una onda senoidal, en la cual la amplitud de la portadora varía en proporción al mensaje.

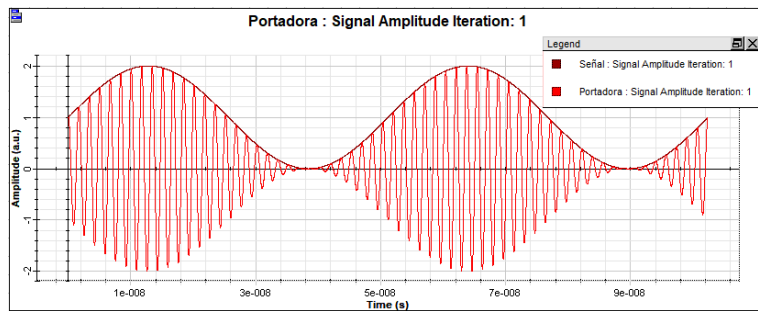


Figura 2.14: Modulación AM de una onda senoidal con índice de modulación igual a 1

### 2.4.1.2. Frecuencia Modulada (FM)

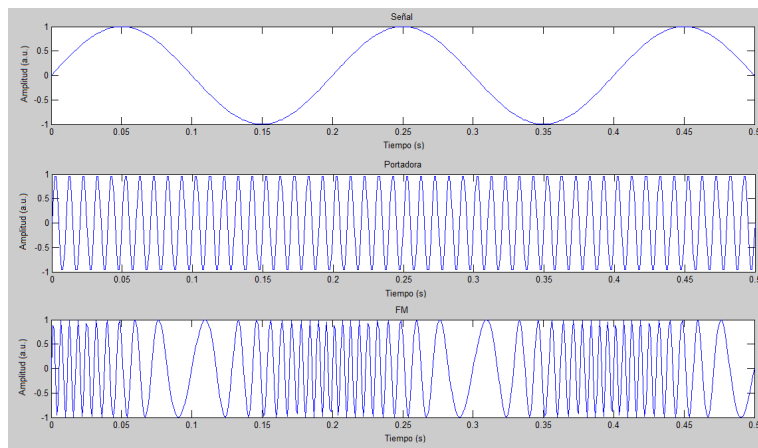


Figura 2.15: Modulación FM de una onda senoidal con índice de modulación igual a 15

FM es otra técnica de modulación analógica, en la cual la frecuencia instantánea de la portadora varía en proporción a la amplitud de la señal moduladora. Es ampliamente usada en radio FM, telecomunicaciones entre otras; de igual manera consta de un índice de modulación que permite variar cuan rápido cambia la frecuencia de la portadora. En la figura 2.15 se observa la modulación FM de una onda senoidal, en la misma se aprecia como varía la frecuencia de la portadora conforme aumenta o disminuye la amplitud del mensaje.

## 2.4.2. Modulación Digital

### 2.4.2.1. Modulación de amplitud en cuadratura (QAM)

QAM es una combinación de las modulaciones [Amplitude Shift Keying \(ASK\)](#) y [Phase Shift Keying \(PSK\)](#). En los sistemas QAM, tanto la fase como la amplitud de la señal varían, creando así niveles de modulación los cuales son transformados en bits por símbolo (n-QAM). Dentro de sus variantes se pueden encontrar [4-QAM](#), [16-QAM](#) y [64-QAM](#). En la figura 2.16 se puede observar los respectivos diagramas de constelación para 4-QAM y 16-QAM.

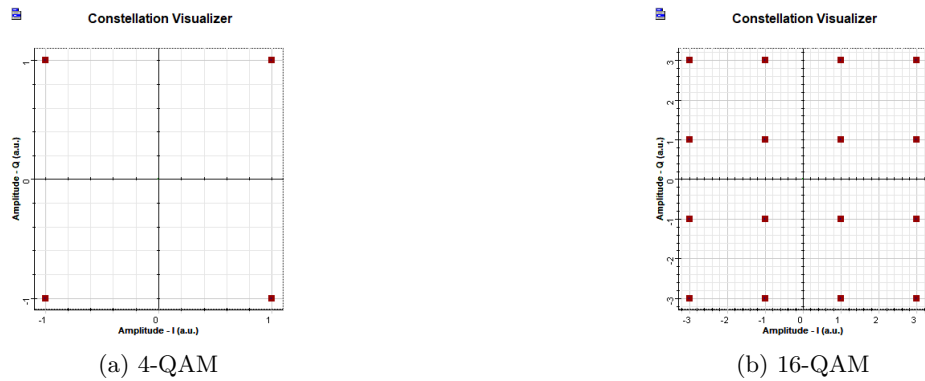


Figura 2.16: Diagrama de constelación para la modulación QAM

La correcta detección de esta modulación depende de la distancia existente entre la señal recibida y la señal de la constelación. La señal QAM transmitida para cada símbolo  $k$  se encuentra definido por

$$S_k(t) = \sqrt{\frac{2E_0}{T}} a_k \cos(2\pi_c t) - \sqrt{\frac{2E_0}{T}} b_k \sin(2\pi_c t)$$

donde  $0 \leq t \leq T$  y  $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, M$ .  $a_k$  y  $b_k$  son enteros y  $E_0$  es la energía de la señal transmitida.

#### 2.4.2.2. Modulación por desplazamiento de fase en cuadratura (QPSK)

QPSK es una división de la modulación PSK, la cual emplea cuatro niveles de modulación donde cada nivel posee una fase específica y dos bits por símbolo. La diferencia entre fases para cada nivel es de  $\pi/2$ , siendo los valores:  $\pi/4$ ,  $3\pi/4$ ,  $5\pi/4$  y  $7\pi/4$ . La ecuación en el dominio del tiempo para una señal QPSK es la siguiente

$$S_i(t) = \sqrt{\frac{2E}{T}} \cos\left[(2i-1)\frac{\pi}{4}\right] \cos(\omega_0 t) - \sqrt{\frac{2E}{T}} \sin\left[(2i-1)\frac{\pi}{4}\right] \sin(\omega_0 t)$$

donde  $0 \leq t \leq T$ ,  $i = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, M$  y  $T$  duración del símbolo. En la figura 2.17 se puede apreciar el respectivo diagrama de constelación de QPSK.

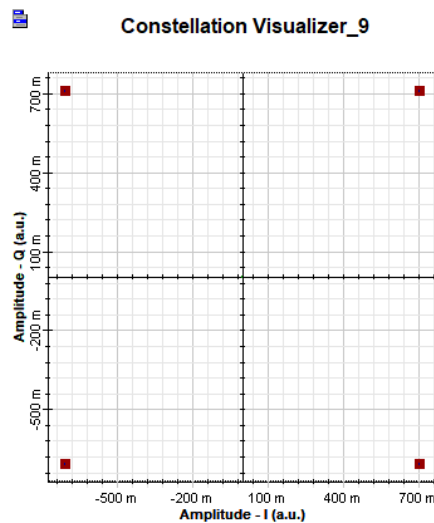


Figura 2.17: Diagrama de constelación para QPSK

## 2.5. Interfaz común de radio pública (CPRI)

La interfaz común de radio pública “*Common Public Radio Interface (CPRI)*”, es un conjunto de especificaciones para transmisiones inalámbricas desarrolladas por un conjunto de empresas entre las cuales están Nokia, Huawei, Ericsson AB, entre otros fabricantes. Este consorcio establece especificaciones y las hace públicas para tener una retroalimentación sobre correcciones o nuevas ideas; el fin de CPRI es permitir a los fabricantes de estaciones base BS utilizar protocolos comunes.

Los protocolos que establece CPRI están destinados a la interfaz entre el control de equipo de radio “*Radio Equipment Control (REC)*” también conocidos como unidades de banda base BBU y el equipo de radio “*Radio Equipment (RE)*” o cabezales de radio remoto RRH, interconectar el transporte de información y comunicaciones de control establecidas entre las unidades REC y los RE. En un inicio CPRI tenía prevista una conexión de fibra óptica total para las redes móviles, debido a que en algunos países aún se utiliza Ethernet para conexiones en redes móviles, en su última versión CPRI 7.0 establece una mejora en la conectividad entre el fronthaul de 5G y las redes Ethernet permitiendo un funcionamiento más adecuado.

La versión 7.0 establece que una estación base consta de dos nodos el controlador del equipo de radio REC y el equipo de radio RE. El REC tiene una conexión con la interfaz de red y con el RE el cual a su vez envía la información a la interfaz de aire tal como se presenta en la figura 2.18

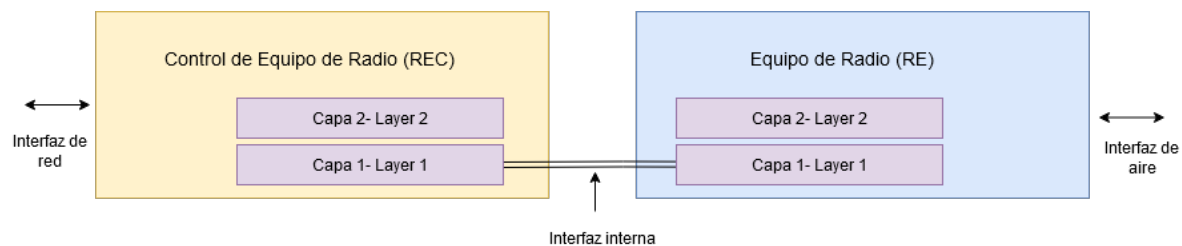


Figura 2.18: Definición del sistema y sus interfaces

Los nodos REC y RE contiene 2 capas sobre las cuales están:

- **Capa 2:**

- **Plano del Usuario:** Es el encargado de transformar la información enviada por el usuario en datos fase y cuadratura (IQ), cada flujo de datos refleja los datos enviados de una antena para una portadora.
- **Control y Gestión:** Se intercambia información de control y gestión entre el REC y el RE, esta información es enviada a capas superiores donde se toma una decisión adecuada según lo enviado.
- **Sincronización:** Envío de información para la sincronización de tiempo y frame.
- **Datos de fase y cuadratura:** Señales en banda base, información del usuario en fase y cuadratura.
- **Información específica del proveedor:** Espacio reservado para especificaciones dadas por el proveedor del equipo.
- **Protocolo en banda L1:** Se da el envío de información de señalización del enlace, necesaria para el mantenimiento y control del tiempo crítico de la capa 1.



- **Capa 1:**

- **Multiplexación por división de tiempo:** Multiplexador utilizado para el paso de información en diferentes portadoras.
- **Transmisor eléctrico y transmisor óptico**

El funcionamiento de las capas mostradas en la figura 2.19 CPRI establece el paso de la información del plano de usuario a datos en fase y cuadratura. Estos son multiplexados según el número de portadoras y enviados a través de uno de los enlaces físicos ya sea eléctrico u óptico, de manera paralela los datos de control y gestión “*Control and Management (CM)*” son enviados como protocolos de banda en caso de existir un tiempo crítico o directamente enviados a la Capa 3 (no definidos por CPRI), debido a la disponibilidad de un enlace óptico o un enlace eléctrico se establece en la Capa 2 dos protocolos el de control de enlace de datos de alto nivel “*High level Data Link Control (HDLC)*” y Ethernet los cuales trabajan con CM y cuya información es multiplexada conjuntamente con los datos en fase y cuadratura del usuario. Existen intervalos para el paso de información del proveedor la cual está controlada por el interfaz de sincronización.[31]

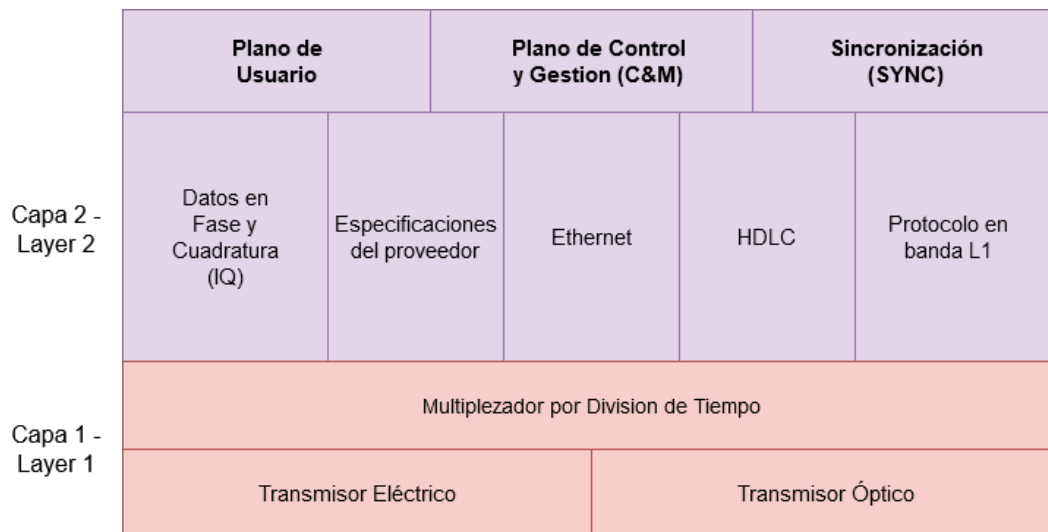


Figura 2.19: Descripción del protocolo CPRI

Además de CPRI existen otras entidades que generan especificaciones para el paso de información y los protocolos a seguir en conexiones inalámbricas y para redes móviles, entre las más importantes se encuentra el proyecto de asociación de tercera generación “*3rd Generation Partnership Project (3GPP)*” que es un conjunto de organizaciones que establece normas y protocolos por los cuales sus siete miembros pueden tener un entorno estable confiriendo a sus equipos especificaciones delimitadas por la asociación, también se cubre tecnologías de telecomunicaciones celulares, incluido el acceso por radio, la red central y las capacidades de servicio, además las especificaciones 3GPP proporcionan medios para el acceso sin radio a la red central y para el funcionamiento conjunto con redes que no son 3GPP.

Otro grupo es la Asociación Publico Privada de infraestructura 5G “*5G Infrastructure Public Private Partnership (5GPPP)*” es una iniciativa de la Comisión Europea que busca a fabricantes, operadores y proveedores de servicio con la finalidad de generar especificaciones y equipos coherentes

con la arquitectura y los servicios de las redes móviles de siguiente generación. Con estas especificaciones y equipos se pretende entre otras cosas llegar a ahorrar hasta un 90 % la energía por servicio prestado, crear una red más segura y confiable, además de tener enlaces de comunicación inalámbricos muy densos que para conectar a billones de usuarios.

### 2.5.1. Interfaz Común de Radio Publica Evolucionada (eCPRI)

La interfaz común de radio pública mejorada “*Enhanced Common Public Radio Interface (eCPRI)*” es la evolución de los protocolos y especificaciones de CPRI para redes móviles puramente 5G, se toma en cuenta una topología en la cual los elementos externos de la red móvil son las unidades de radio remotas RRU las cuales comprenden antenas y unidades informáticas. Las unidades RRU se conectan con las BBU formando el fronthaul de la red, estas conexiones en 5G deben ser mediante fibra óptica para poder soportar el ancho de banda necesario en la nueva generación.

El tipo de conectividad y las capas que estos poseen se observan en la figura 2.20 donde se aprecia una capa física o capa de transporte de red la cual conecta al eCPRI control de equipo de radio “*eCPRI Radio Equipment Control (eREC)*” y el eCPRI equipo de radio “*eCPRI Radio Equipment (eRE)*” mediante una red de transporte basada en paquetes. Sobre esta capa física se encuentra la capa 2 que ha diferencia de CPRI cambia a tener dos funcionalidades, eCPRI está encargada de generar las especificaciones necesarias para el paso de información de la capa 1 o capa física a los planos de la parte superior; la segunda función son los protocolos estándar que realizan la función de capa 2 para paquetes IP o Ethernet dando así una mayor cobertura a diferentes tipos de escenarios.

Sobre la capa 2 se establecen tres planos:

- **Plano de Usuario:** Es el encargado de analizar la información del usuario que será transmitida desde/hacia el usuario, control y gestión de tiempo crítico directamente relacionado con información del usuario y brinda un servicio de soporte al plano de usuario.
- **Plano de Control y Gestión:** Se usa para el traspaso de información de control y gestión de los eREC y eRE hasta las capas superiores donde se toman las decisiones, esta información no se considera crítica en cuanto a tiempo de procesamiento.
- **Plano de Sincronización:** En este plano se controla los tiempos y la sincronía entre los equipos eREC y eRE, de igual forma se maneja tiempos de *frame* y de procesamiento para maximizar las capacidades de los equipos.

Los puntos de acceso a servicio “*Service Access Points (SAP)*” son puntos que permiten el paso de información de la capa 2 a las capas superiores, cada plano de la capa 2 posee un SAP.

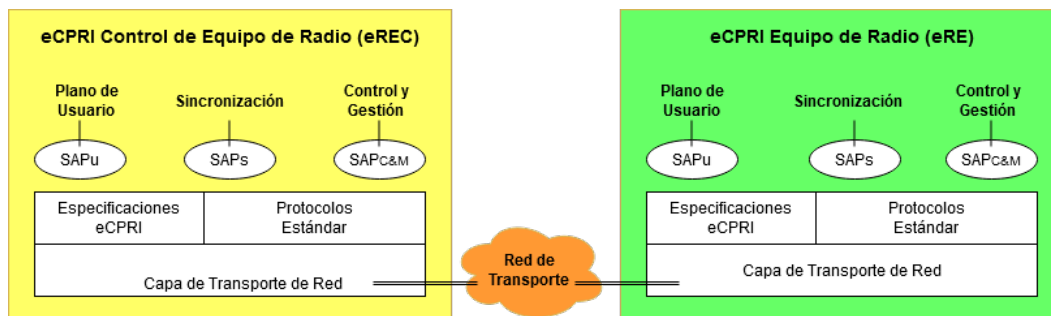


Figura 2.20: Definición del sistema y la interfaz

Para tener un mejor funcionamiento eCPRI considera que un nodo B de siguiente generación evolucionada “*Enhanced Next Generation Node B (eNB)*” / nodo B de siguiente generación “*Next Generation Node B (gNB)*” están compuestos como mínimo por un eREC y un eRE. Al tener esto en cuenta se plantea una división de 5 etapas para las funcionalidades de eRE que pasan a ser controladas por el eREC. Se consideran 5 divisiones ya que si solo se tuviera una única división se perderían algunas funcionalidades importantes como la coordinación entre celdas algo indispensable en una red móvil.

En la figura 2.21 se muestra las funciones de la división física que deberían de realizar el eREC y el eRE dentro de un eNB/gNB, el eREC realiza las funciones del controlador del clúster remoto “*Remote Cluster Controller (RCC)*”, el protocolo de conversión de paquete de datos “*Packet Data Convergence Protocol (PDCP)*” que controla la llegada de todos los datos, control de radio enlace “*Radio Link Control (RLC)*” que permite controlar la potencia y frecuencia en el radio enlace, control de acceso al medio “*Media Access Control (MAC)*” útil para el enlace de múltiples usuarios. El medio físico se controla de manera conjunta entre el eREC y el eRE para de esta forma permitir al eRE aumentar su capacidad de procesamiento en la función de RF. Al tener esta distribución de funciones se logra tener un mayor número de portadoras, red MIMO con procesamiento de juntas en enlace de bajada y de subida, lo cual permite un uso eficiente del ancho de banda; sin embargo, las desventajas de una división de funciones en la capa física se presentan en la red *fronthaul* donde se necesita una latencia menor para el paso de datos e información de control [32].

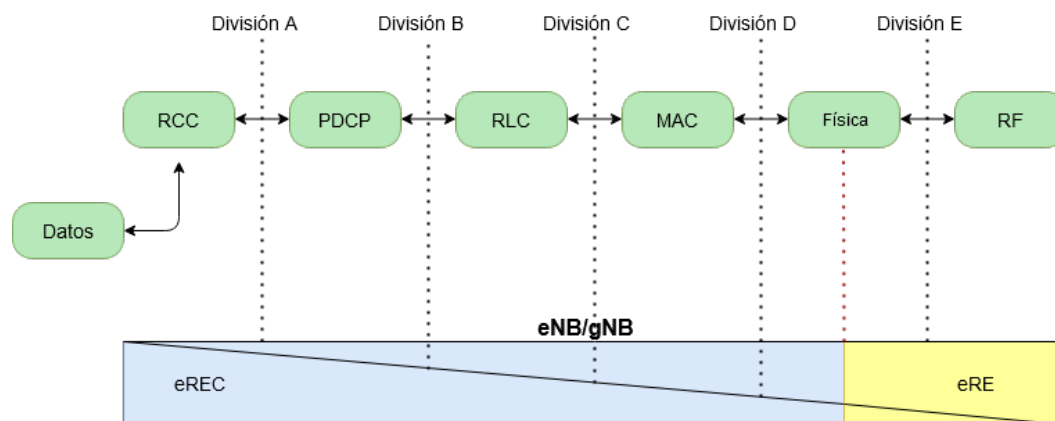


Figura 2.21: Descomposición de función a nivel de capa de transporte de red

## 2.6. Red óptica pasiva (PON)

Las redes PON son tecnologías de telecomunicaciones mediante las cuales se entrega acceso de banda ancha a varios usuarios, teniendo un enlace punto-multipunto “*Point-to-multipoint (P2M)*”. Se la conoce como pasiva debido a que los elementos activos (OLT para el transmisor y ONT para el receptor) se encuentran solo en los extremos de la red, es decir, no se encuentra ningún elemento energizado dentro de la red de distribución.

M. Elmagzoub et al. [8] presentan cuatro tipos de PON, definidas por la técnica de multiplexación empleada: multiplexación por división de tiempo “*TDM*”, multiplexación por división de código ortogonal “*Optical Code Division Multiplexing (OCDM)*”, WDM y multiplexación por división de frecuencia ortogonal “*Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)*”. Sin embargo, la técnica actualmente empleada en las redes actuales es TDM, razón por la cual se detalla a continuación.

### 2.6.1. Red óptica pasiva con multiplexación por división de tiempo (TDM)

TDM se encuentra ampliamente desarrollada en la actualidad, ya que es la técnica de multiplexado por excelencia que todas las redes PON y GPON emplean. TDM-PON, en el enlace de carga que se transmite en 1310 nm, la línea terminal óptica “*Optical Line Terminal (OLT)*” asigna intervalos de tiempo para cada unidad de red óptica “*Optical network units (ONUs)*” conforme el usuario lo demande. Por lo cual, se le permite usar todo el ancho de banda disponible en su intervalo de tiempo. Para el caso del enlace descarga (1490 nm), éste transmite en broadcast hacia todos lo usuarios, donde el usuario sólo puede acceder a los datos que le corresponden mediante su dirección de control de acceso al medio “*Media Access Control (MAC)*”; brindando un nivel de seguridad y privacidad en la red [8].

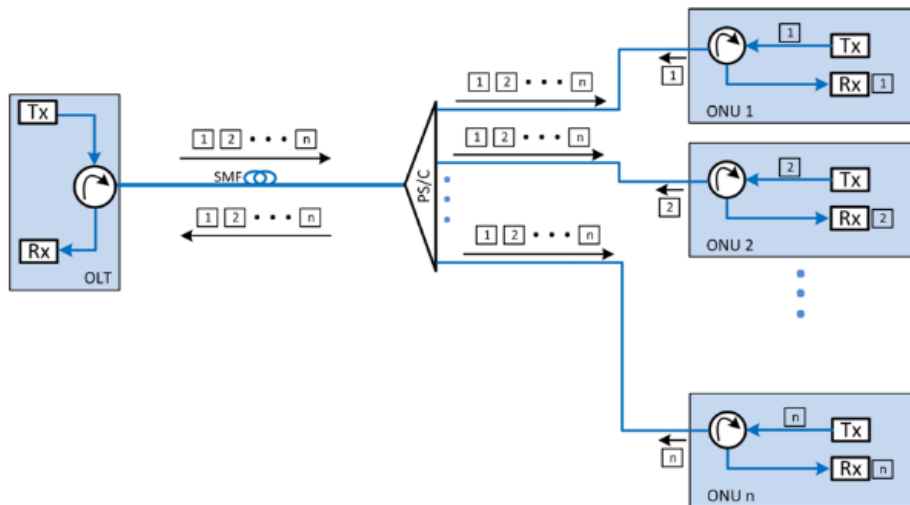


Figura 2.22: Diagrama de operación de una red TDM-PON [8]

En la figura 2.22 se visualiza el proceso TDM; al tratarse de una red pasiva P2M, la distribución se realiza mediante un divisor/combinador de potencia en los RN logrando entregar servicio, en la actualidad, hasta 64 usuarios por cada puerto de Optical Network Terminal (ONT).

## 2.7. Tecnología FTTx

La tecnología fibra hasta x “*Fiber to the x (FTTx)*” es en la actualidad la red de acceso más importante, ya que ofrece a sus usuarios altas tasas de datos y gran ancho de banda. Es sucesora de las redes de cobre y coaxial, aunque en ciertas regiones de Ecuador aun están presentes.

El despliegue masivo de redes de fibra óptica, se dio debido a la alta competencia existente entre los proveedores del servicio y por la migración de los usuarios a redes más rápidas, con menor latencia, servicios en la nube y con un costo por el servicio similar.

Si bien, no resulta económica la inversión de los proveedores para migrar su red, para mantenerse en el mercado se ven obligados ya que a largo plazo ofrece una rentabilidad considerable. Una ventaja de estas redes es que no se limita a brindar solo el servicio de acceso de banda ancha a los hogares, sino que se encuentra en constante evolución y mediante normativas como la NG-PON2 se podrán brindar funciones como *backhaul* y/o *fronthaul* para el servicio móvil o conexión con clientes empresariales [33].

### 2.7.1. Arquitectura FTTx

La x en el acrónimo FTTx es un identificativo del destino de la red o en su defecto, la distancia al usuario final tal como se muestra en la figura 2.23. Por lo tanto, las más importantes según [33] son:

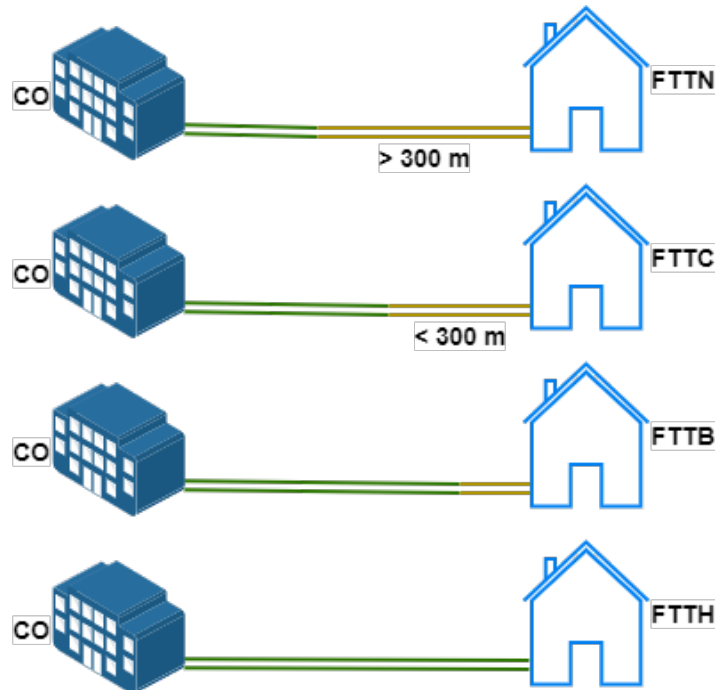


Figura 2.23: Tipos de FTTx

#### 2.7.1.1. Fibra hasta el hogar (FTTH)

La fibra hasta el hogar es la más conocida entre todas las redes FTTx, llega hasta el hogar del usuario mediante fibra óptica y dispositivos pasivos de distribución óptica para brindar servicio de acceso de banda ancha. Se trata de una red P2M en la cual mediante un solo hilo de fibra óptica se obtiene el enlace de descarga y carga, operando a 1490 nm y 1310 nm respectivamente. En la figura 2.24 se puede observar la respectiva arquitectura.

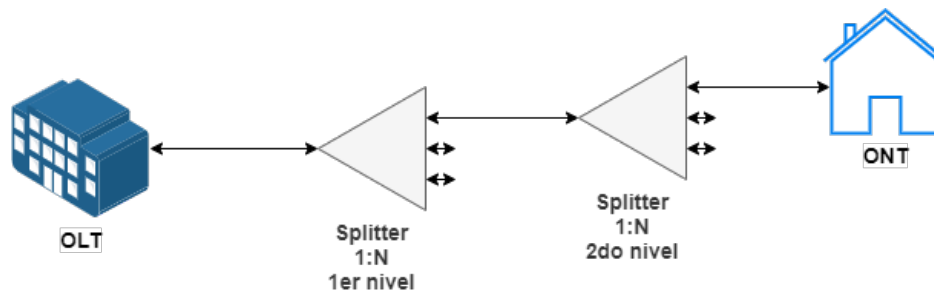


Figura 2.24: Arquitectura FTTH

### 2.7.1.2. Fibra hasta la cabina o armario (FTTC)

La fibra hasta la cabina “*Fiber-to-the-curb (FTTC)*” es un servicio de acceso de banda ancha que combina fibra óptica y cobre, como se muestra en la figura 2.25. Para lo cual depende de un equipo entre la central telefónica y el abonado, conocido como multiplexor de acceso de línea de abonado digital “*Digital Subscriber Line Access Multiplexer (DSLAM)*”. El enlace entre central y DSLAM es fibra óptica, mientras que el enlace DSLAM y abonado es cobre de corto alcance, permitiendo el uso de tecnología de línea de abonado digital de muy alta tasa de transferencia “*Very high-bit-rate Digital Subscriber Line (VDSL)*” que ofrece velocidad teórica de carga y descarga de 10 Mbps y 40 Mbps, respectivamente.

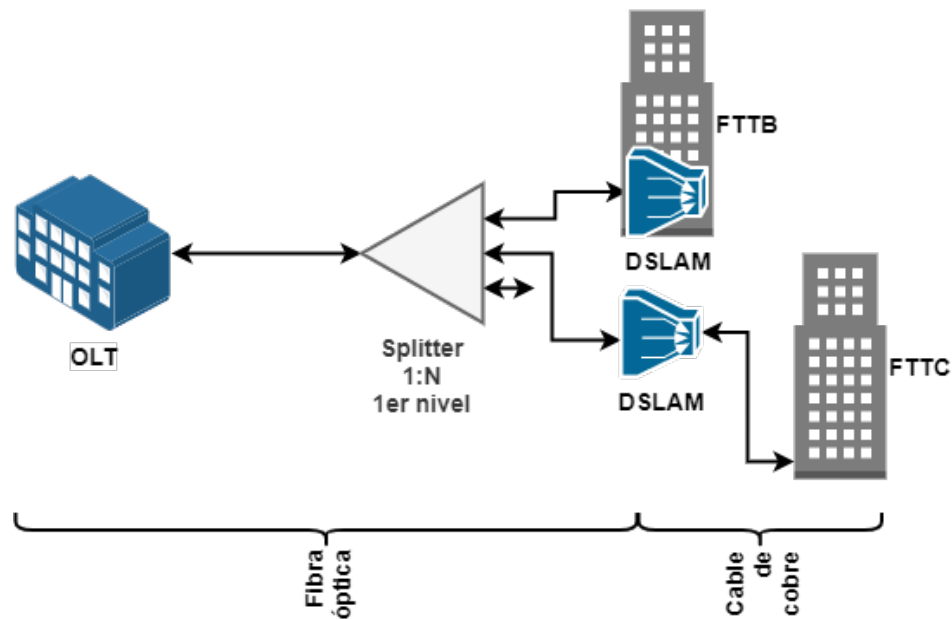


Figura 2.25: Arquitectura FTTC y FTTB

### 2.7.1.3. Fibra hasta el edificio (FTTB)

En la figura 2.25 se puede observar la arquitectura de la fibra hasta el edificio “*Fiber-to-the-building (FTTB)*”. Lo que diferencia FTTB de FTTC es que el DSLAM se encuentra dentro del edificio, es decir la fibra óptica llega al edificio. Para otorgar el servicio a los abonados, se debe realizar la distribución mediante conexión inalámbrica, cable coaxial, par trenzado entre otros.

### 2.7.1.4. Fibra hasta el nodo (FTTN)

La fibra hasta el nodo “*Fiber-to-the-node (FTTN)*” es un tipo de arquitectura donde los abonados se encuentran agrupados en un sector o barrio. La fibra óptica llega hasta el armario y luego se distribuye hasta los hogares implementando diferentes tecnologías (ver figura 2.26). El radio de operación del nodo o armario es de 1500 m y puede tener cientos de abonados.

Tabla 2.3: Arquitectura FTTx en función de distancia hacia el usuario

Arquitectura	Distancia
FTTN	Fin de fibra óptica entre 1.5 a 3 Km del usuario.
FTTC	La cabina o armario se encuentra entre 300 y 600 m del usuario.
FTTB	La fibra óptica llega al punto de distribución dentro del edificio.
FTTH	La fibra óptica llega al interior de la vivienda.

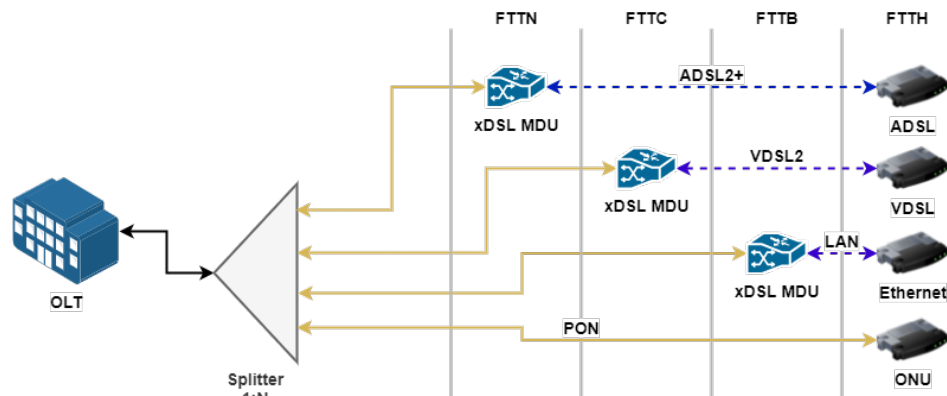


Figura 2.26: Arquitectura FTTN

### 2.7.1.5. Comparativa de arquitecturas FTTx

Una vez explicada las arquitecturas más importantes, se procede a realizar una comparativa en función de la distancia al abonado, obteniendo como resultado lo mostrado en la tabla 2.3.

## 2.8. Simulador de redes de fibra óptica

### 2.8.1. OptiSystem

El software OptiSystem permite realizar simulaciones de sistemas fibra óptica, mediante su interfaz gráfica y sus numerosas características y funcionalidades se pueden realizar pruebas de error, simulaciones de enlaces de fibra óptica en capa de transmisión, diseños de redes y observar su comportamiento variando algunas características. Con sus funcionalidades y nuevas versiones se tienen cada vez más posibilidades de simular entornos o sistemas nuevos como lo son RoF, sistemas de acceso múltiple por división de código en entorno óptico “*Optical Code Division Multiple Access (OCDMA)*”, además de poder realizar redes BPON, EPON, GPON, no solo su diseño sino también en el comportamiento y el ajuste de algunos parámetros en los transmisores, receptores y demás elementos intermedios como *splitter*, amplificadores, la fibra óptica, multiplexores y el láser utilizado en cada red que se simula. Adicionalmente se cuenta con medidores como diagramas de ojo, diagramas de constelación, analizadores de espectro óptico y eléctrico, lo cual permite mejorar y aumentar las capacidades de la simulación dando la oportunidad a los usuarios de revisar el comportamiento de las redes simuladas. Como se observa en la figura 2.27, la interfaz del software de OptiSystem tiene un panel lateral ubicado a la izquierda de la pantalla con el cual se puede añadir elementos al Main Layout o entorno de diseño. Este entorno está ubicado en la parte central en donde los usuarios podrán realizar la integración de

los elementos deseados para su simulación, esto con el fin de hacer el funcionamiento del simulador algo más sencillo e intuitivo.

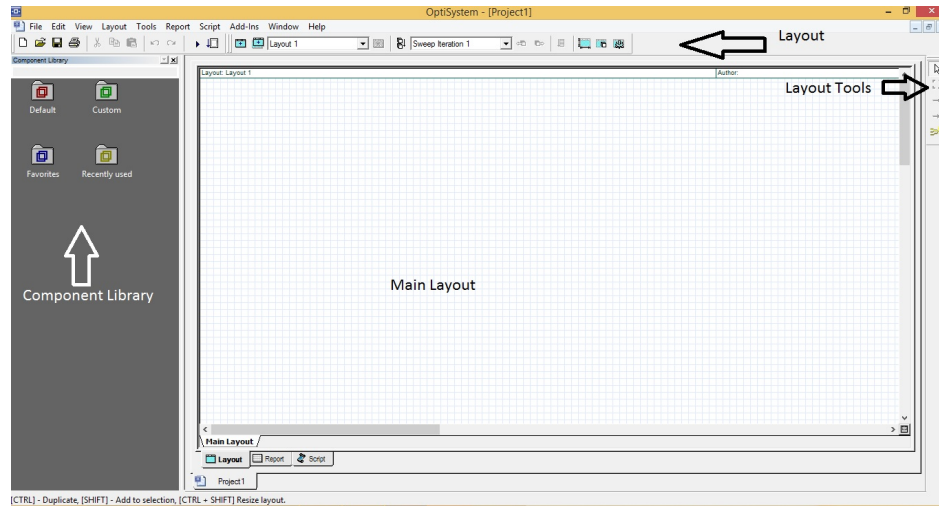


Figura 2.27: Pantalla inicial y componentes principales del simulador OptiSystem. Cabrera, Zambrano

Para poder ingresar componentes y empezar a armar la red es necesario dirigirse hasta el Component Library y hacer clic en la carpeta de Default, se abren más carpetas específicas para el desarrollo de la red como por ejemplo la carpeta de Visualizer Library donde se encuentran elementos de medición como diagrama de ojo, analizadores de espectro, etc; también se encuentra la carpeta Transmitters Library con elementos como Pulse Generators y Optical Sources. La figura 2.28 muestra los diferentes tipos de fuentes ópticas que se pueden utilizar en las simulaciones. Para colocarlo en el Main Layout se debe de arrastrar el elemento hasta cualquier punto del mismo y soltar.

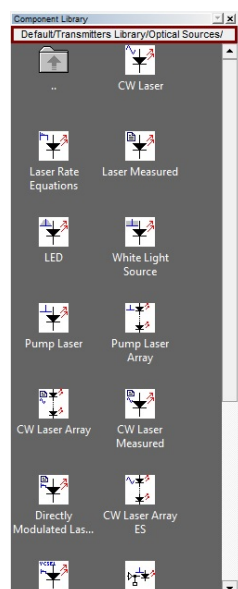


Figura 2.28: Elementos de transmisión óptica para simulación. Cabrera, Zambrano

Como se dijo anteriormente entre las cualidades de OptiSystem es el poder modificar las caracte-



rísticas de los elementos para que de esta forma se asemeja más al funcionamiento real. Para ello al colocar el puntero sobre el elemento se puede hacer clic derecho y luego ir a la opción de Component Properties o hacer doble clic sobre el elemento y aparecerá una ventana como la observada en la figura 2.29 con la cual se puede modificar en este caso las características del diodo láser utilizado, esto se aplica para todos los elementos dando un margen de simulación muy amplio. Con todo esto el usuario puede crear una red de fibra óptica simple como la que se observa en la figura 2.30 donde se tiene una red sencilla armada con transmisores, receptores y visualizadores para poder entender el comportamiento de la señal.

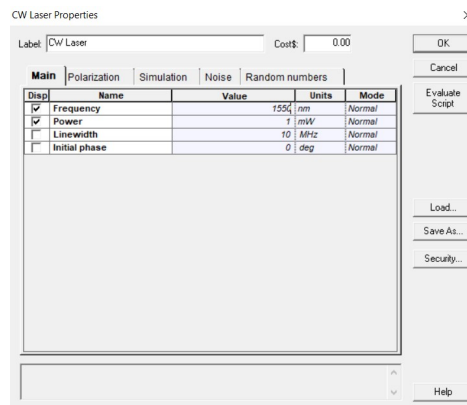


Figura 2.29: Ventana de propiedades de CW láser. Cabrera, Zambrano

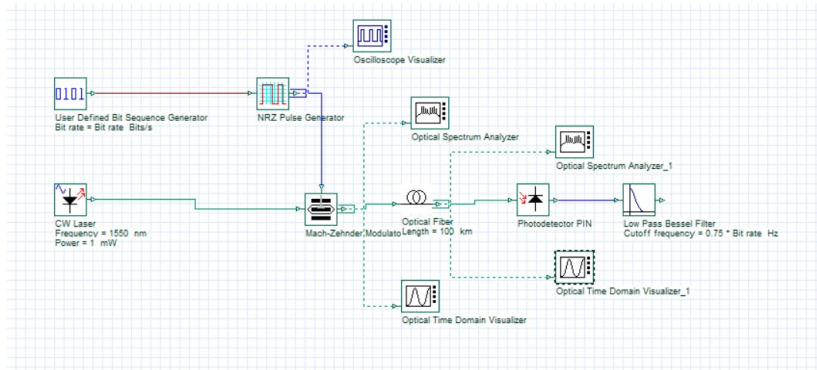


Figura 2.30: Simulación de una red de fibra óptica mediante OptiSystem. Cabrera, Zambrano

## 2.9. Conclusiones

GPON es una red que se encuentra ampliamente desplegada alrededor del mundo y que aún no alcanza su clímax de investigación, ya que siguen habiendo mejoras en su tecnología. La fibra óptica es un medio de transmisión que ofrece grandes posibilidades por su amplio espectro, el cual se debe explotar para obtener la mayor ventaja posible sobre una red existente.

De igual manera, RoF provee técnicas para su implementación sobre dicha red, ofreciendo multiplexaciones de canales con lo cual se pueden transmitir varias señales. Las señales enviadas pueden ser directamente ondas de radio que se pueden radiar, logrando así una disminución del costo invertido en procesamiento en cada BS.



Sin embargo, antes de su implementación es necesario realizar pruebas que determinen la viabilidad del sistema, por lo cual realizar simulaciones es primordial para tener una idea clara del comportamiento existente. La ventaja de hoy en día es el uso de software que emulan con base en modelos matemáticos el proceder de cada componente involucrado en un despliegue tecnológico.

CAPÍTULO  
**3**

---

## Metodología de desarrollo y simulación

En el presente capítulo se describe la metodología de simulación de los equipos involucrados en la red, tanto para **FTTH** como para **RoF**. Finalmente se realiza un modelo de red con distintos escenarios y variación de parámetros.

Se consignan los procesos de diseño de los diversos escenarios propuestos para poder analizar el rendimiento y la eficiencia del sistema **GPON-FTTH** ante la inserción de **RoF**, para el servicio móvil.

La arquitectura de la red **FTTH** se simula acorde a los modelos existentes en la actualidad, teniendo en cuenta que es una red full dúplex, con la leve diferencia de la adición del módulo **RoF** en la oficina central y una **BS** conectada al último nivel de *splitter*, logrando el enlace *fronthaul* de la red móvil.

### 3.1. Diseño de la simulación mediante OptiSystem

Para el diseño se considera el software OptiSystem de la empresa Optiwave la cual proporciona descargas de prueba por 3 meses para cualquier usuario. Para la obtención de los resultados de medición del rendimiento y eficiencia de la red, se considera necesario seguir los siguientes pasos:

1. Definición de los escenarios de prueba.
2. Diseño y prueba de la red **GPON-FTTH**.
3. Diseño y prueba de la red **RoF**.
4. Prueba de la red integrada **FTTH-RoF**.
5. Comparación de resultados.
6. Conclusiones.

En general, el presente trabajo basa su diseño de simulación en el diagrama de flujo mostrado en la figura 3.1.

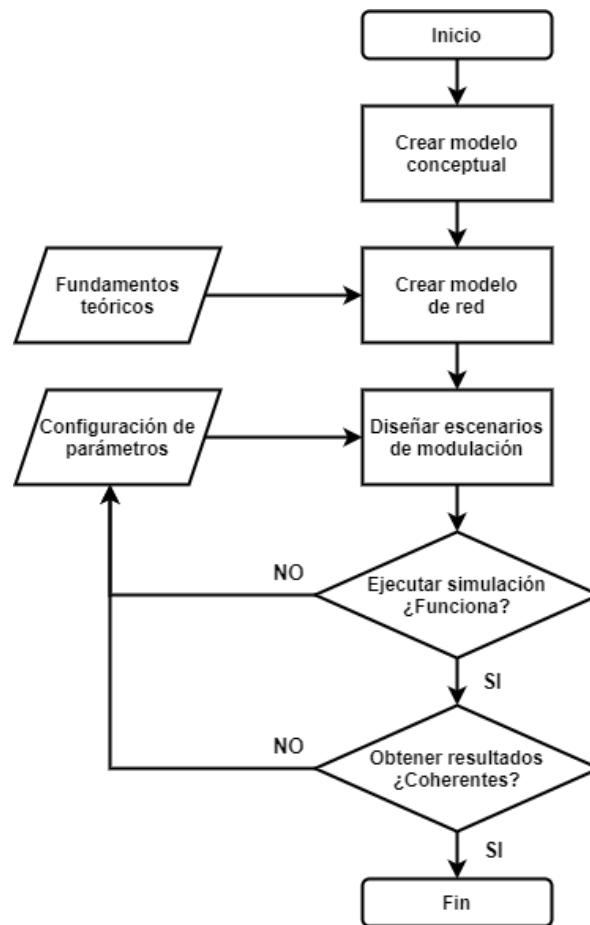


Figura 3.1: Diagrama de flujo para diseño y evaluación de la red

## 3.2. Modelo conceptual para el diseño

Inicialmente, dentro del planteamiento se contempla la definición del modelo conceptual que permita analizar el rendimiento y eficiencia de una red FTTH ante la inserción de RoF para el servicio móvil 5G.

El modelo consta de la red FTTH que brinda el servicio de acceso de banda ancha para descarga y carga de datos, a la cual se le insertará el módulo RoF para la transmisión de señales para el servicio móvil; siendo FTTH la red *fronthaul*. El rendimiento y eficiencia de la red serán evaluadas conforme los parámetros OPM mencionados en la sección 2.2.

En la figura 3.2 se muestra el escenario general del diseño, de manera conceptual. Así mismo, se indica el esquema de multiplexación (figura 3.3) a seguirse para la convergencia de los servicios FTTH y RoF.

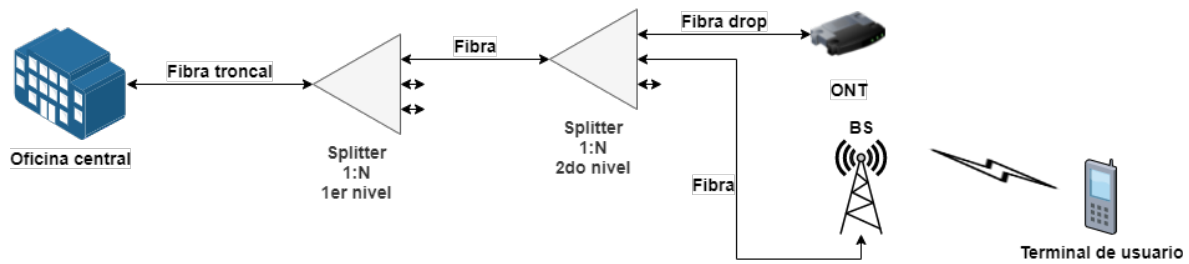


Figura 3.2: Escenario general del diseño

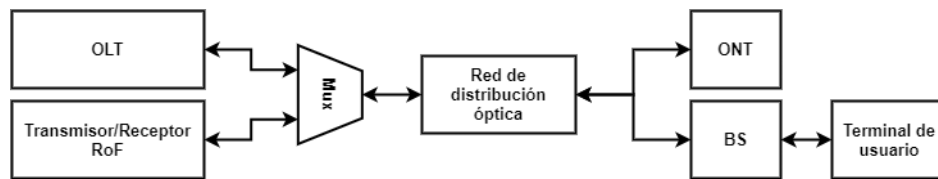


Figura 3.3: Esquema de multiplexación de servicios

El diagrama de bloques representativo de la **OLT** para la red **FTTH** se muestra en la figura 3.4. Se aprecia al generador de datos que ingresa al modulador óptico con un láser, modelando la parte transmisora. Así mismo, la parte receptora de la **OLT** la conforma un filtro óptico, fotodetector y el receptor de datos.

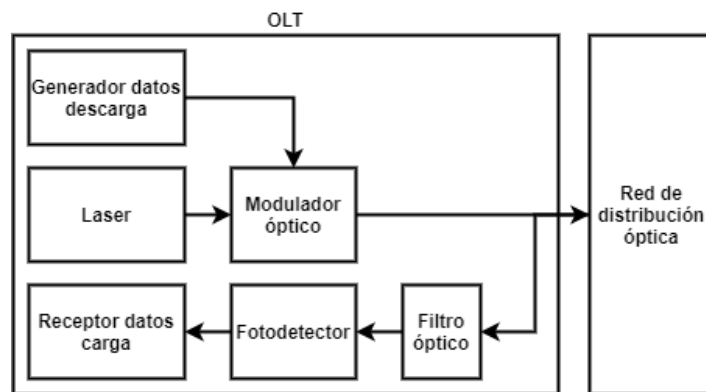


Figura 3.4: Modelo general de OLT

Para el caso del transmisor/receptor **RoF**, el respectivo diagrama de bloques se presenta en la figura 3.5. Para la parte transmisora, se compone de un generador de datos, un bloque modulador, modulador **OFDM** y un modulador de cuadratura cuya resultante ingresa al modulador **MZM**. De la misma forma, para la parte receptora, la señal ingresa al filtro óptico, el fotodetector realiza la conversión óptico-eléctrica, para realizar el debido procesamiento hasta obtener los datos requeridos.

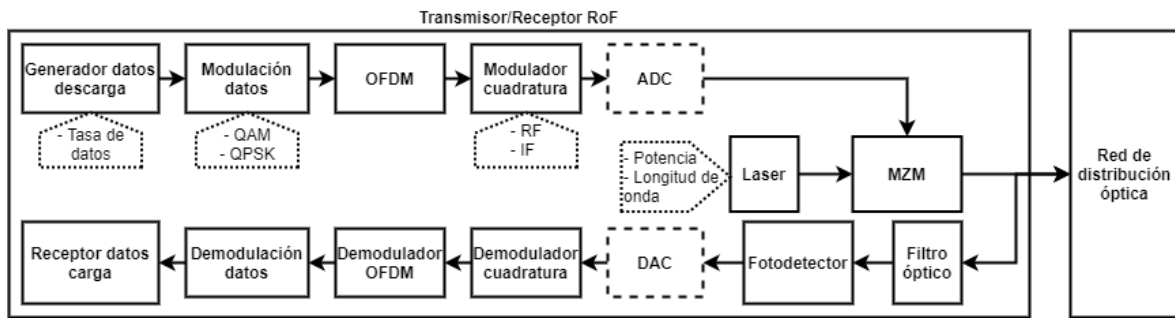


Figura 3.5: Modelo general del equipo RoF

La señal transportada por la red de distribución ingresa a la BS, pasando un filtro óptico. El fotodetector se encarga de realizar la conversión óptica-eléctrica para luego pasar al amplificador de potencia y ser irradiada (figura 3.6). En el lado del terminal del usuario, la señal se encuentra en el dominio eléctrico, por lo cual para obtener los datos se procesa la señal; para el caso del enlace de carga, la conversión electro-óptica se encuentra en BS, ya que recibirá señal eléctrica de parte del usuario.

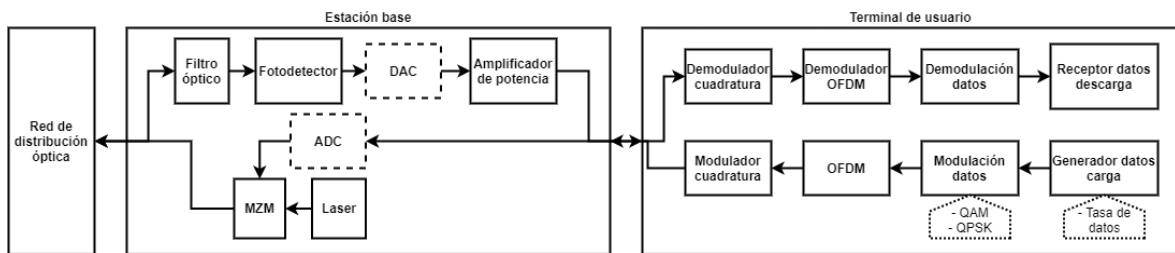


Figura 3.6: Modelo general de la recepción del sistema RoF

Con base en lo anteriormente explicado, se obtiene el siguiente modelo conceptual (figura 3.7). En este se puede observar las variables manipulables (azul) y los parámetros de monitoreo obtenidos (rojo) para el sistema.

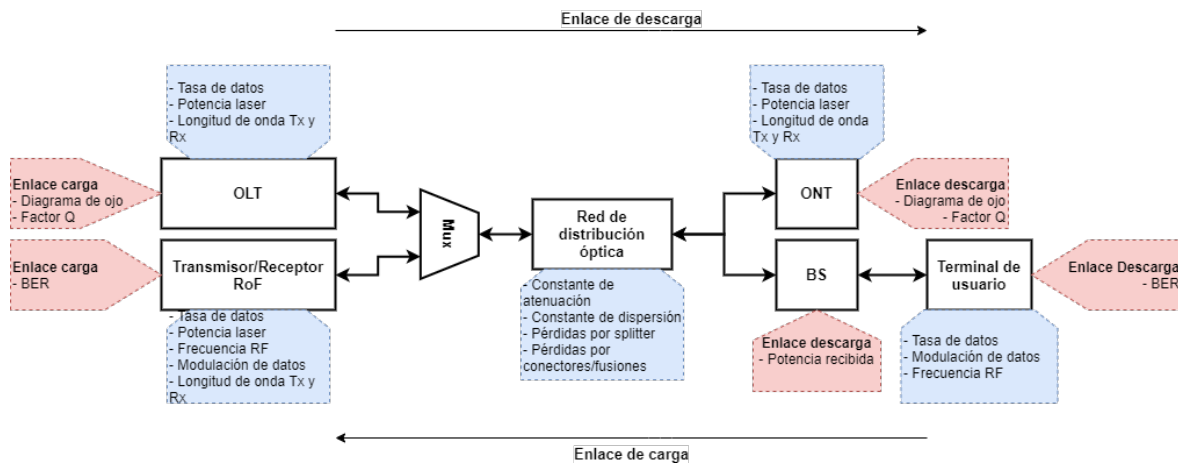


Figura 3.7: Modelo conceptual planteado



### 3.2.1. Descripción del modelo de red GPON-FTTH

Para el caso de la red FTTH se considera una topología con dos niveles de *splitter* 1:8, con una distancia total del enlace desde OLT al último nivel de *splitter* (caja NAP) igual a 6 km. La distancia del enlace entre Network Access Point (NAP) y ONT (usuario final) es de 500 m.

- **Subsistema de transmisión:**

- **Láser:**

- ◇ Tipo: láser de onda continua.
- ◇ Longitud de onda: enlace descarga 1490 nm, enlace carga 1310 nm.
- ◇ Potencia: enlace descarga 0 dBm, enlace carga -3 dBm.

- **Generador de datos:**

- ◇ Tasa de bit: enlace descarga 2.5 Gbps, enlace carga 1.25 Gbps.

- **Modulador óptico:**

- ◇ Tipo: externo MZM.

- **Sistema multiplexor/demultiplexor:**

- **Canales:**

- ◇ Enlace descarga: 1490 nm y 1552.52 nm (193.1 THz).
- ◇ Enlace carga: 1310 nm y 1550.91 nm (193.3 THz)

- **Ancho de banda:** 25 GHz.

- **Filtro:**

- ◇ Tipo: Bessel.
- ◇ Orden: 4.

- **Subsistema de canal óptico:**

- **Fibra óptica:**

- ◇ Constante de atenuación: 0.2 dB/Km.
- ◇ Constante de dispersión: 16 ps/nm/km.

- **Atenuaciones:**

- ◇ Atenuación por conectores: 1.2 dB
- ◇ Atenuación por fusiones: 0.9 dB

- **Subsistema de recepción:**

- **Fotodetector:**

- ◇ Tipo: PIN
- ◇ Longitud de onda: 1490 nm y 1310 nm.

- **Filtro óptico:**

- ◇ Tipo: Bessel.
- ◇ Orden: 4.

### 3.2.2. Descripción del modelo RoF

Dentro del escenario general planteado, se considera una distancia variable desde la caja NAP hasta BS, dentro del rango de 500 m a 30 Km.



- **Subsistema de transmisión:**
  - **Láser:**
    - ◇ Tipo: láser de onda continua.
    - ◇ Longitud de onda: enlace descarga 1552.52 nm (193.1 THz), enlace carga 1550.91 nm (193.3 THz).
    - ◇ Potencia: enlace descarga 0-20 dBm, enlace carga 0-20 dBm.
  - **Generador de datos:**
    - ◇ Tasa de bit: enlace descarga 5 Gbps, enlace carga 5 Gbps.
  - **Modulación de datos:**
    - ◇ 4-QAM, 16QAM, 64 QAM
  - **Modulador de cuadratura:**
    - ◇ RF, IF.
  - **Modulador óptico:**
    - ◇ Tipo: externo MZM.
- **Subsistema de BS:**
  - **Fotodetector:**
    - ◇ Tipo: PIN
    - ◇ Longitud de onda: 193.1 THz y 193.3 THz.
  - **Filtro óptico:**
    - ◇ Tipo: Bessel.
    - ◇ Orden: 7.
  - **Amplificador eléctrico:**
    - ◇ Ganancia: 16 dB.
- **Subsistema de recepción:**
  - **Fotodetector:**
    - ◇ Tipo: PIN
    - ◇ Longitud de onda: 193.1 THz y 193.3 THz.

Conforme lo expuesto en el capítulo 2 acerca de la tecnología RoF, además del modelo planteado en la figura 3.5, se propone dos casos de estudio, los mismos que se detallan a continuación:

- Caso de estudio No. 1: Transmisión de señales empleando A-RoF.
- Caso de estudio No. 2: Transmisión de señales empleando D-RoF

### 3.3. Definición del modelo de red en OptiSystem

Conforme el modelo conceptual, se procede a realizar el esquemático en OptiSystem. Inicialmente, se comprueba el correcto funcionamiento de la red FTTH, de igual manera se comprueba que los resultados generados por la red RoF sean consistentes para posteriormente implementar los casos de estudio.



Tabla 3.1: Parámetros de simulación para el sistema GPON

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Tasa de bit DL	2.5 Gbps	Tasa de bit UL	1.25 Gbps
No. bits	8192	Muestras por bit	16
Potencia Tx CO	0 dBm	Potencia Tx UE	-5 dBm
Pérdida por conector	0.2 dB	Atenuación de fibra	0.2 dB/Km
Pérdida por fusión	0.2 dB	Coefficiente de dispersión	16 (ps/nm*km)

### 3.3.1. Diseño de la red FTTH

Con base en el objetivo planteado, verificar la operación de RoF sobre una red FTTH, se procede a simular una red GPON bidireccional. La misma consta de 3 secciones principales, OLT, red de distribución óptica “*Optical Distribution Network (ODN)*” y ONUs. El sistema implementado se muestra en la figura 3.8, mientras que los parámetros para la ejecución del mismo se presentan en la tabla 3.1.

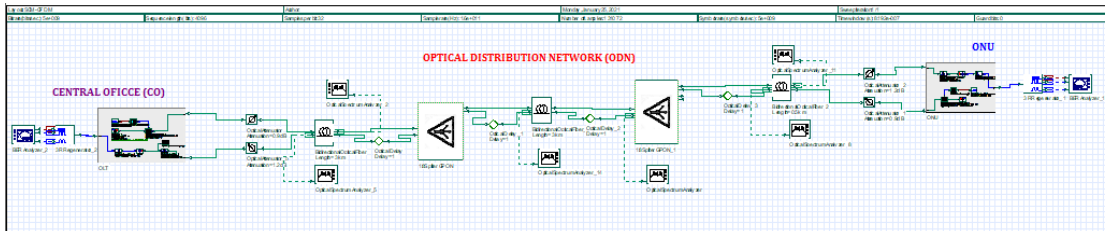


Figura 3.8: Red GPON en Optisystem

A continuación se procede a explicar de forma detallada los subsistemas que involucran a toda la red.

#### 3.3.1.1. Terminal de línea óptica (OLT)

En la oficina central de una red GPON se encuentra la OLT, la misma que se encarga de la transmisión en el enlace de descarga y recepción en el enlace de carga de datos. Para la implementación en el simulador, el transmisor del enlace de descarga, se empleó un generador de secuencia binaria pseudo-aleatoria “*Pseudo-random Bit Sequence (PRBS)*”, conjuntamente con un generador de pulso sin retorno a cero “*Non return to zero (NRZ)*” inyectado al láser de modulación externa, él mismo que se encuentra a una longitud de onda de 1490 nm y una potencia de 0 dBm. De igual forma, para el receptor del enlace de carga se usó de un filtro óptico pasa banda, seguido del láser receptor a 1310 nm. Para comprobar la eficiencia mediante el factor de calidad Q, se usó un analizador BER. Los elementos que componen la OLT se pueden visualizar en la figura 3.9.

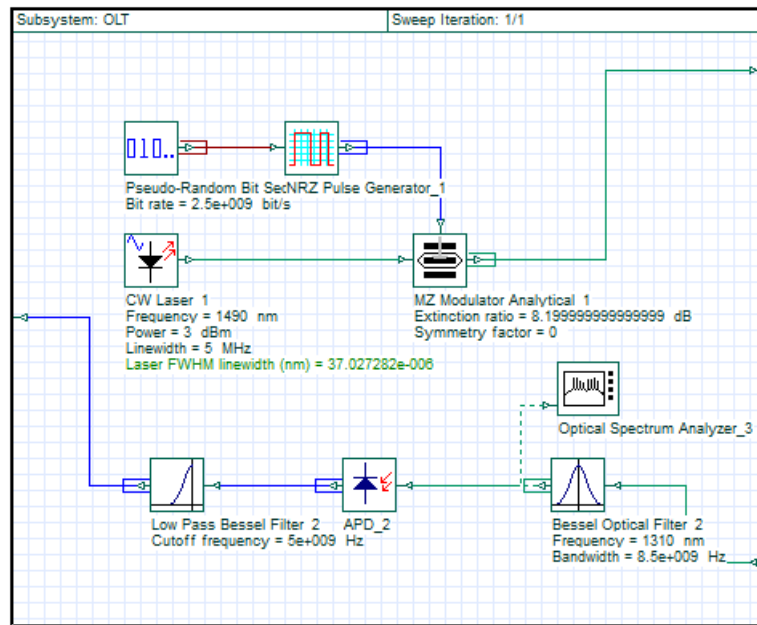


Figura 3.9: Diagrama de bloques de OLT

### 3.3.1.2. Red de distribución

Para la red de distribución óptica se simula un esquema que consta de dos niveles de *splitter* 1:8, 2 enlaces de fibra de 3Km y un enlace de 500m con el cual se conecta los terminales de usuario. En la figura 3.10 se observan atenuaciones, lo que representa pérdidas por conectores y fusiones. Cabe mencionar que el componente **Optical Delay** es por motivos de simulación y no representa ningún componente en una red real.

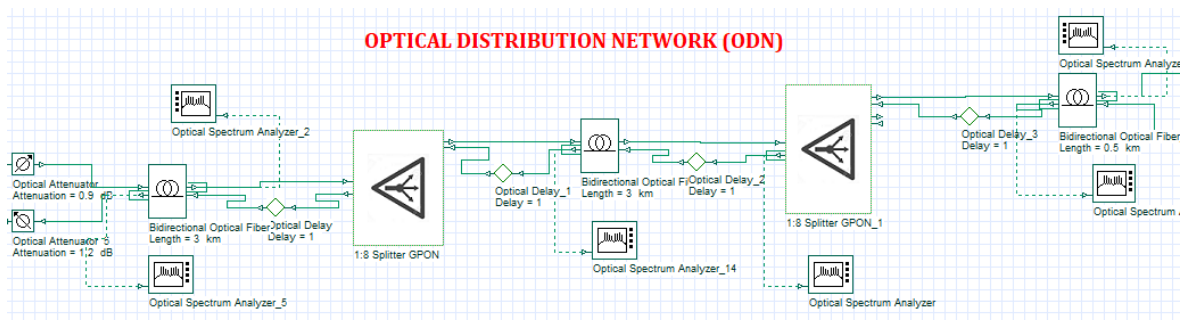


Figura 3.10: Red de distribución óptica con atenuaciones y splitters

En la implementación del *splitter*, se requirieron dos bloques: un divisor de potencia para el enlace de descarga y un combinador de potencia para el enlace de carga. El diagrama de bloques correspondiente se puede observar en la figura 3.11.

### 3.3.1.3. Unidad de red óptica (ONU)

Para la representación de los usuarios finales en una red GPON se realiza un sistema similar al empleado en el terminal de línea óptica OLT, con la leve diferencia de que los bloques transmisores

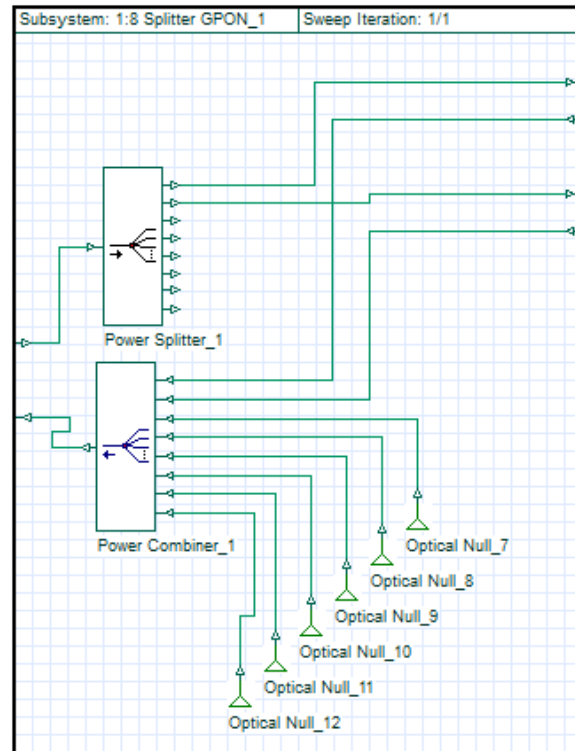
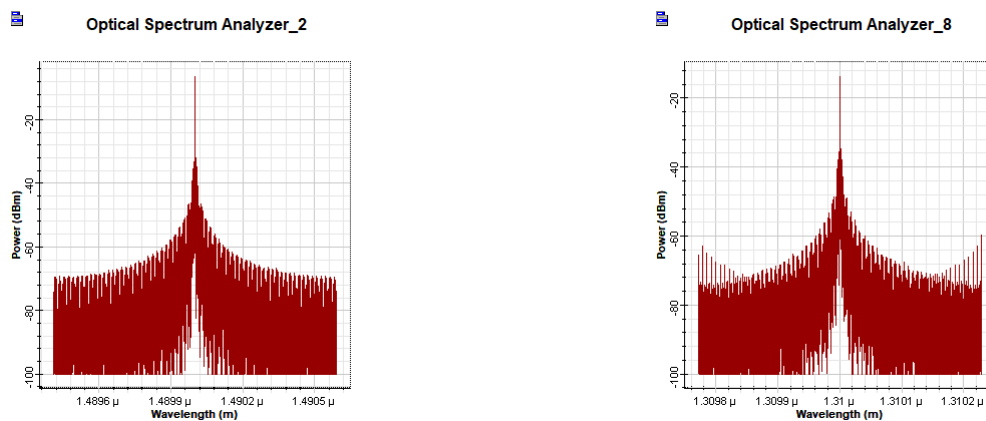


Figura 3.11: Elementos que componen un splitter 1:8

ahora operan en 1310 nm. Los diagramas de bloques correspondientes se pueden observar en la figura 3.12.

Con el sistema completo se realiza la simulación de la red FTTH. Para comprobar su correcto funcionamiento se considera el factor de calidad  $Q$  como parámetro de eficiencia. En la figura 3.13 se muestra el espectro óptico tanto del enlace de descarga como del enlace de carga, observándose que se encuentran en sus respectivas longitudes de onda y con un nivel de señal superior a los -18 dBm.



(a) Espectro óptico en enlace de descarga

(b) Espectro óptico en enlace de carga

Figura 3.13: Transmisión y recepción de bits en la red GPON

En la recepción del enlace de descarga se tiene un factor  $Q = 22$ , indicando una buena calidad del

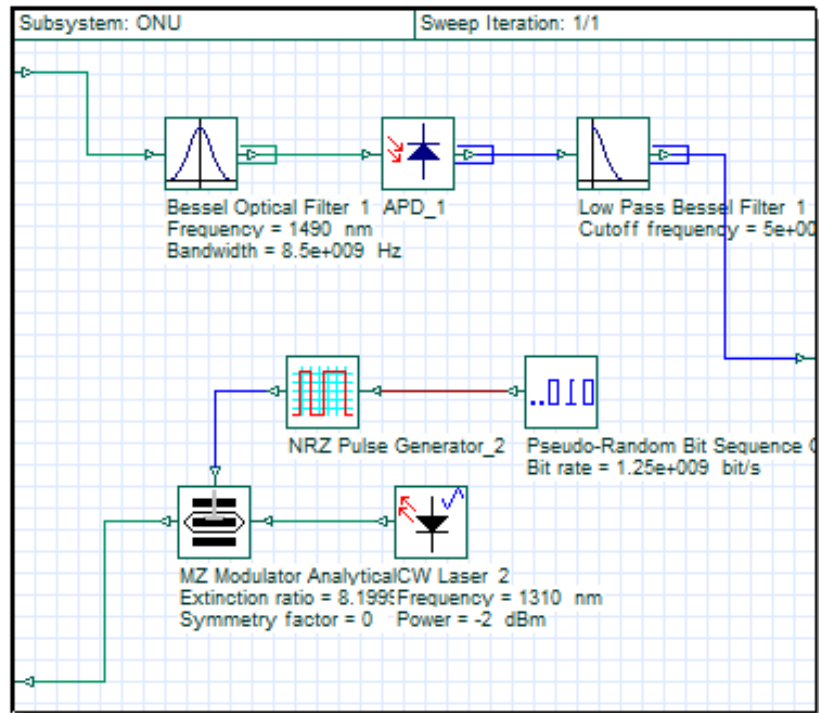


Figura 3.12: Diagrama de bloques de ONU

enlace. De igual manera se procede a mostrar el diagrama de ojo, el mismo que se puede apreciar en la figura 3.14, donde se observa que no existe ISI.

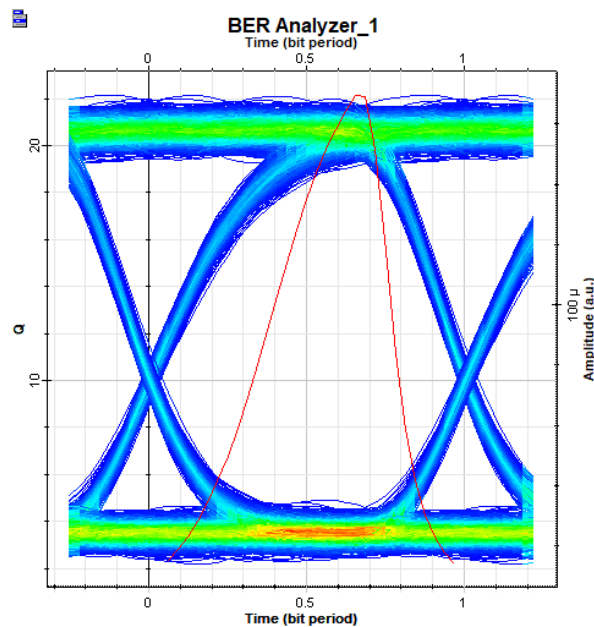


Figura 3.14: Diagrama de ojo del enlace FTTH

Tabla 3.2: Parámetros de simulación para el sistema RoF

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Tasa de bit de 1 canal	20 Gbps	Separación canales WDM	100 GHz
No. sub-portadoras OFDM	128	BW de canal WDM	25 GHz
No. puntos FFT	1024	Longitud de fibra	10 - 100 Km
RF [GHz]	2.4, 5.8, 10.8, 18	Atenuación de fibra	0.2 dB/Km
Potencia de láser	-5 a 10 dBm	Coefficiente de dispersión	16 (ps/nm*km)

### 3.3.2. Simulación de tecnología RoF

Para verificar la correcta implementación de RoF en el simulador se analiza la propuesta realizada por Mustafa A. Jalil en su artículo [1] y compara consistencia con los resultados obtenidos. El sistema consta de 8 canales WDM, donde cada uno de estos posee 4 canales RF con SCM a frecuencias de 2.4 GHz, 5.8 GHz, 10.8 GHz y 18 GHz. Cada canal RF transmite a una tasa de 5 Gbps, con lo cual se tendrían 32 canales RF. Los parámetros empleados conforme lo establece el autor, se muestran en la tabla 3.2. El sistema completo se presenta en la figura 3.15, el mismo que consta de tres partes: transmisor, canal de fibra y receptor; dichas partes se explican con detalle más adelante.

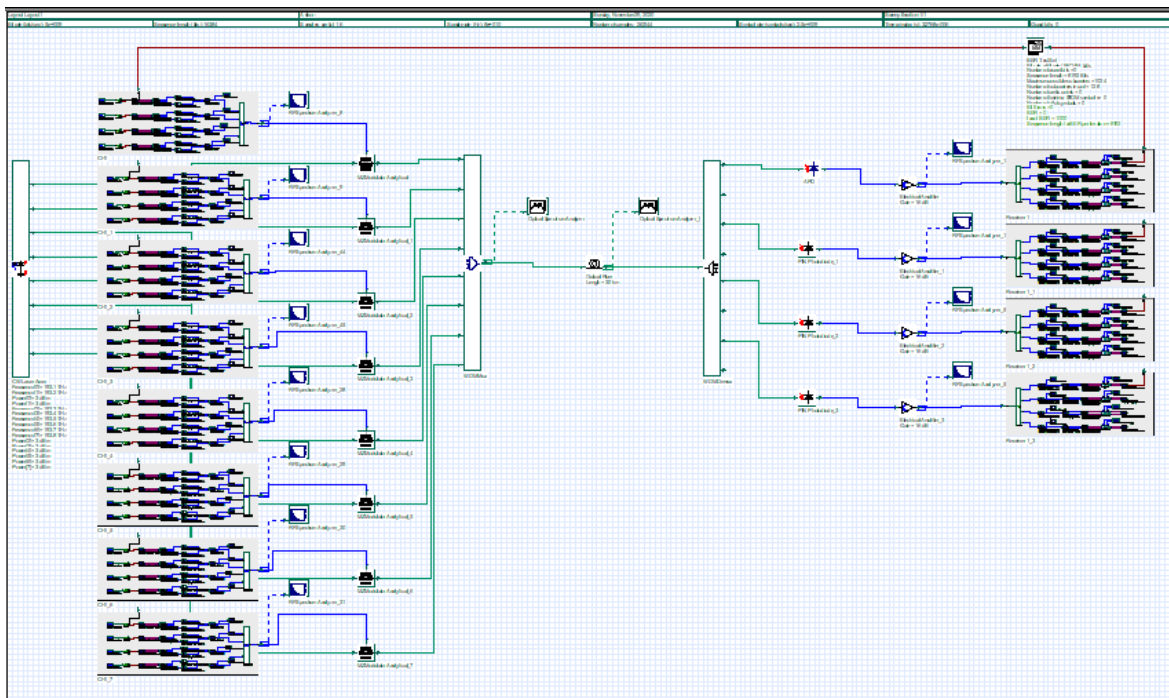


Figura 3.15: Sistema RoF simulado

#### 3.3.2.1. Transmisor RoF

Como se mencionó, cada canal WDM consta de 4 canales RF los mismos que se pueden observar en la figura 3.17. Cada canal opera a una RF y consta de los siguientes elementos: generador PRBS, modulador QAM, modulador OFDM, Low-pass filter (BPF) y modulador de cuadratura (véase figura 3.16). La señal generada por el modulador de cuadratura se envía al modulador MZM, cuya potencia de láser es un parámetro para visualizar la eficiencia de la red.

Como se plantea realizar simulaciones con distintos tipos de modulaciones, para el caso de QAM es necesario cambiar el número bits por símbolo y para el caso de QPSK, se debe cambiar el bloque por un modulador QPSK manteniendo la misma estructura. Para mayor información respecto a esta modulación, revisar el apéndice A.

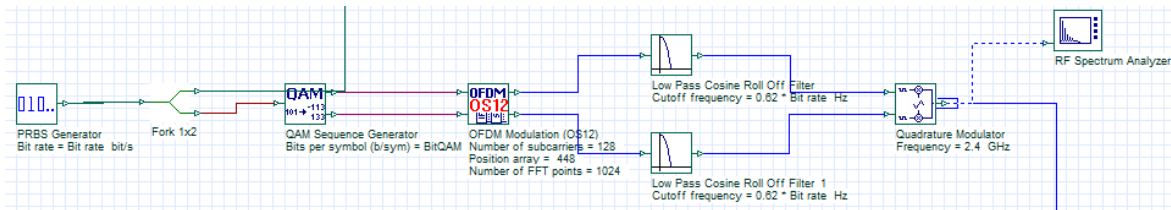


Figura 3.16: Subsistema que conforma un canal RoF

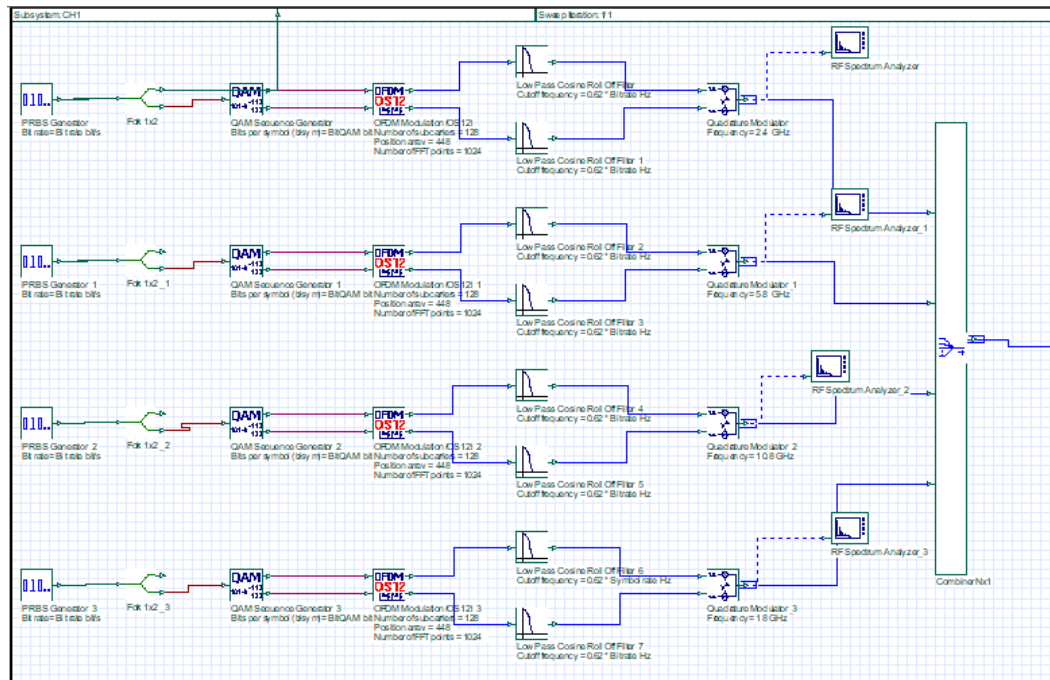


Figura 3.17: Subsistema que conforma un canal WDM

### 3.3.2.2. Canal de fibra óptica

Al tratarse de un sistema que multiplexa varios canales, es necesario presentar dentro del canal de fibra óptica los elementos multiplexador WDM y demultiplexor WDM. En la figura 3.18 se pueden observar los elementos anteriormente mencionados, cada uno de estos se encuentran configurados conforme se indicó en la tabla 3.2. De igual manera se configura la fibra óptica con distintas longitudes y un coeficiente de atenuación constante.

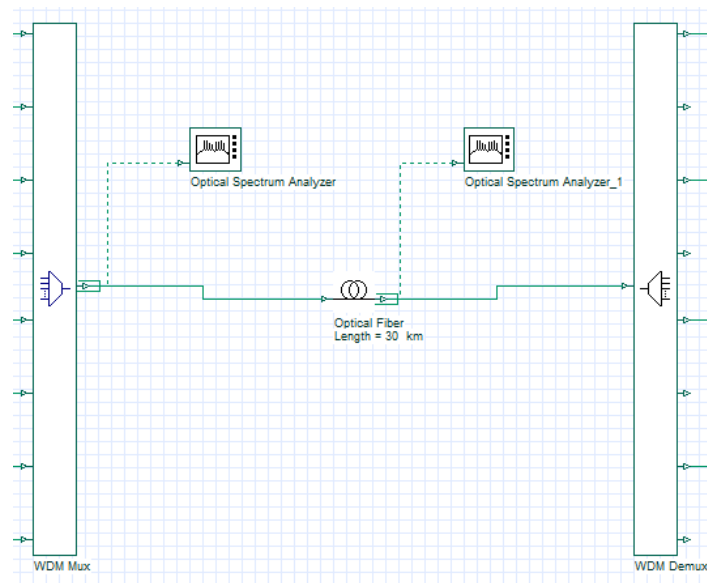


Figura 3.18: Medio de transmisión para el sistema RoF

### 3.3.2.3. Receptor RoF

En el lado receptor se realiza la conversión óptico-eléctrica y amplificación de la señal resultante, lo cual se aprecia en la figura 3.19. Una vez convertida la señal, se utiliza un componente bifurcador (fork) para así procesar cada frecuencia y obtener los bits enviados. Para lo anterior es necesario un BPF, un demodulador de cuadratura, demodulador OFDM y decodificador QAM. Estos bits son enviados al analizador BER para obtener así la eficiencia de la red; en la figura 3.20 se observa lo antes mencionado.

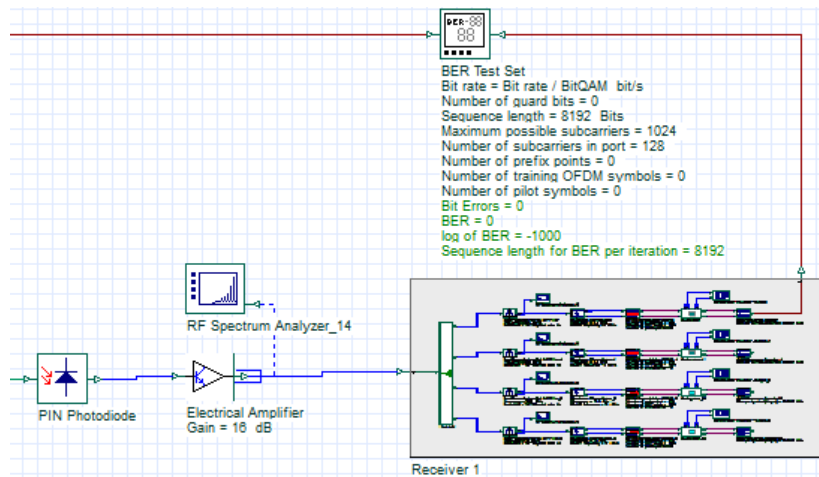


Figura 3.19: Proceso de recepción RoF

Una vez armado el sistema, se ejecuta la simulación para obtener resultados y comprobar con los expuestos en [7]. En la figura 3.21 se observa el espectro óptico de los 8 canales WDM para 4-QAM, 16-QAM y 64-QAM. Se aprecia la correcta multiplexación de los canales transmitidos, mientras que en la figura 3.21d se logran ver las cuatro señales que acompañan a la portadora óptica en 193.1 THz, correspondientes a las 4 señales eléctricas transmitidas. De igual manera se muestran en la figura 3.23

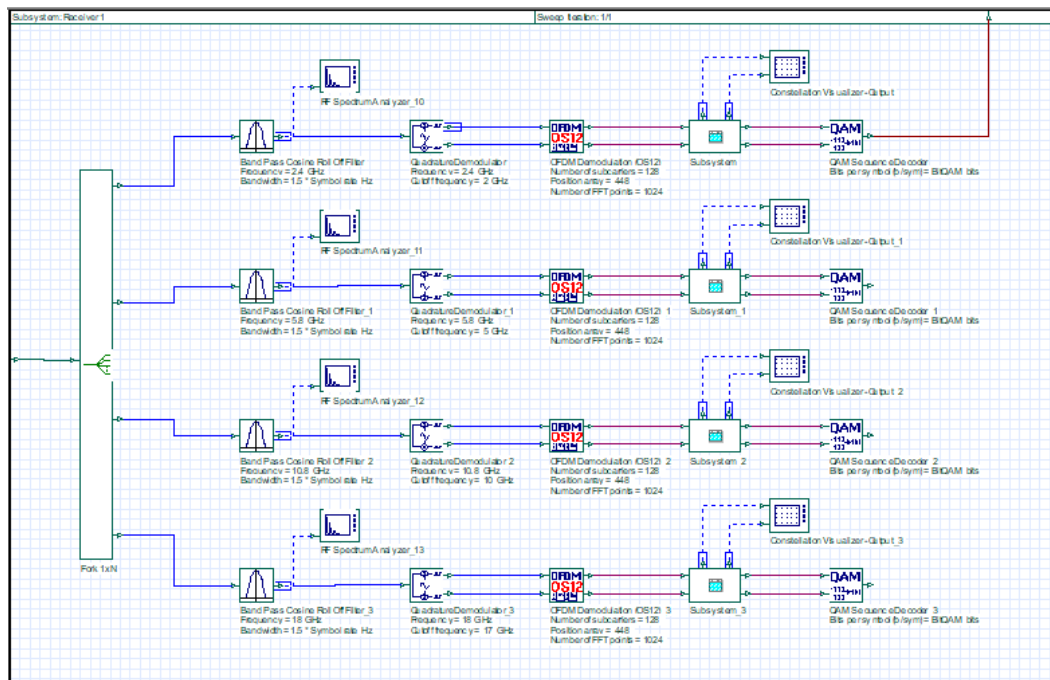


Figura 3.20: Procesamiento de la señal para la obtención de bits

los diagramas de constelación para los canales RF de 2.4 GHz y 18 GHz para los mismos formatos de modulación. Se distinguen correctamente los niveles representativos de cada modulación QAM.



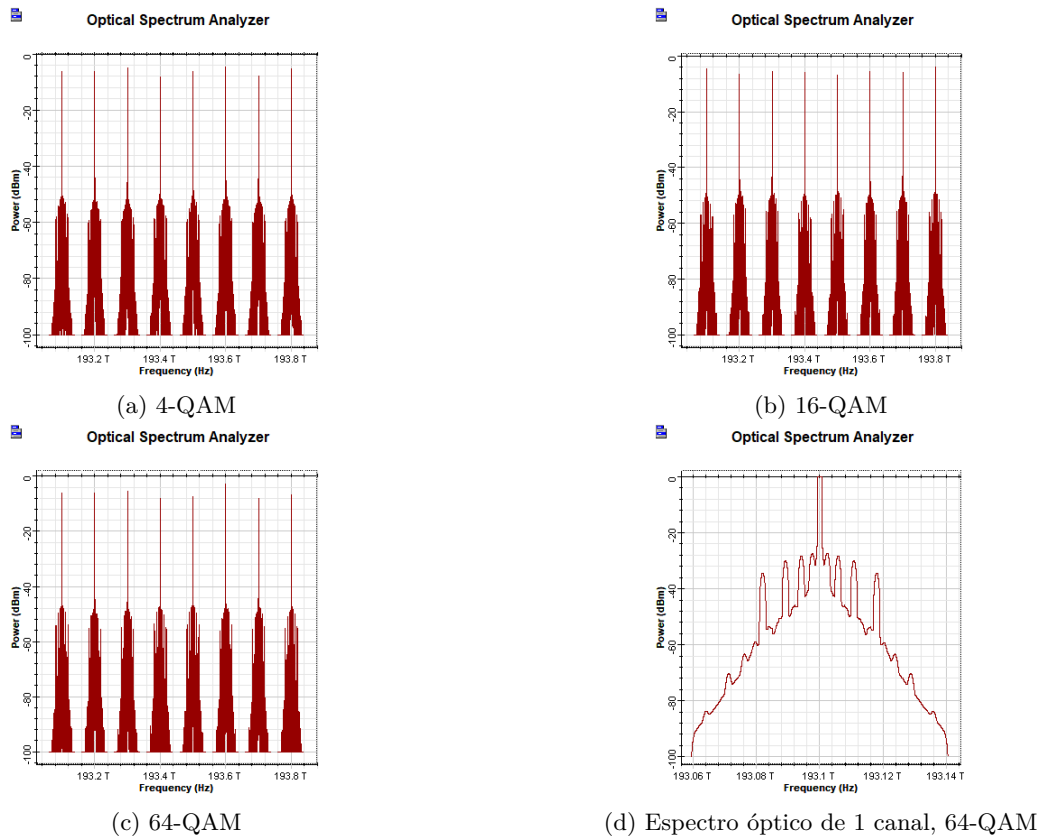


Figura 3.21: Espectro óptico de los canales WDM

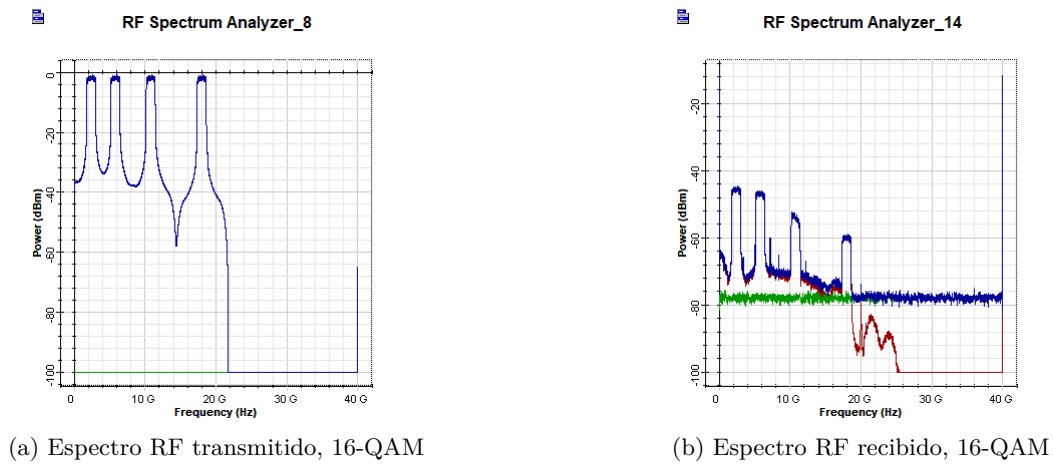


Figura 3.22: Espectro eléctrico de los canales SCM

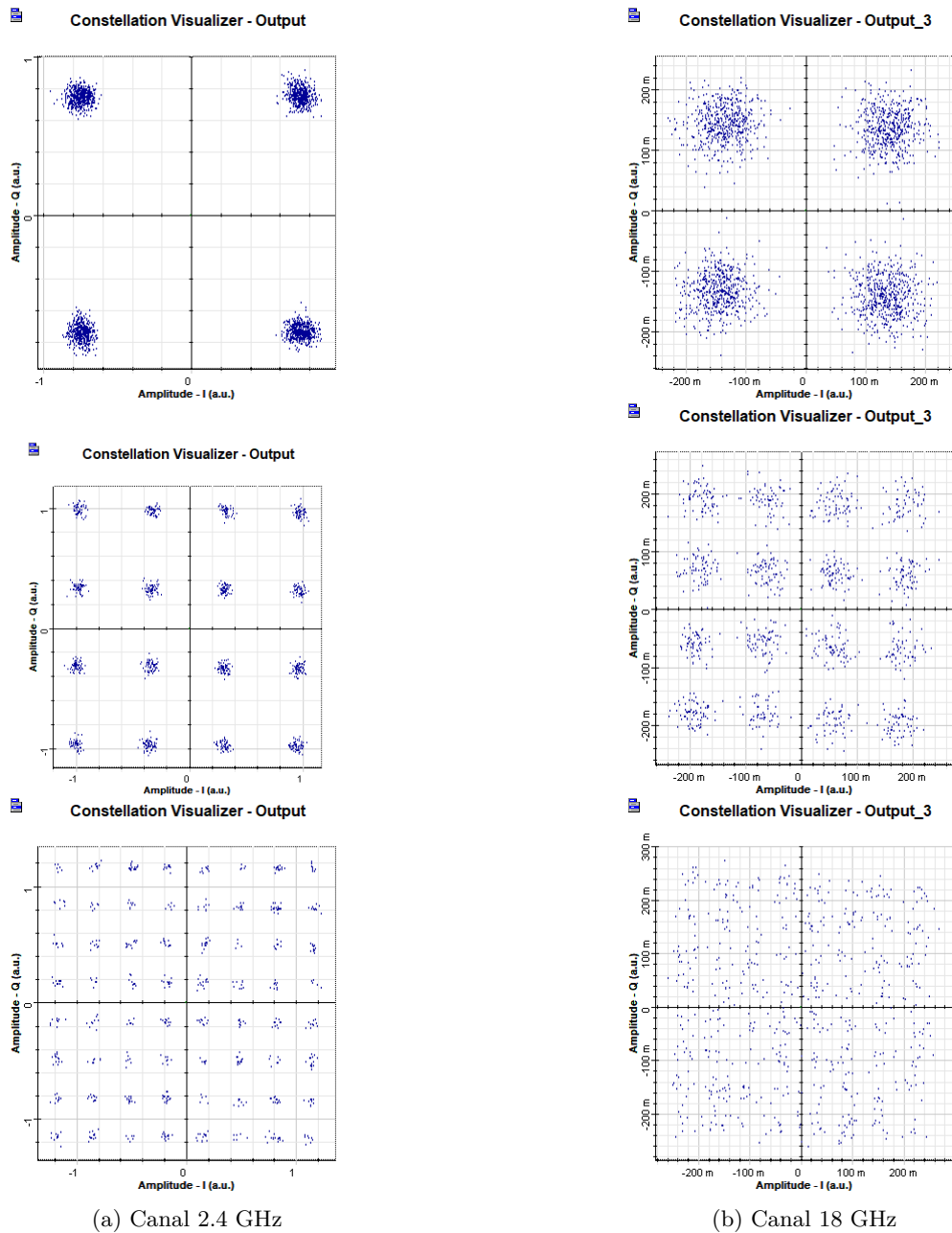


Figura 3.23: Diagrama de constelación del sistema RoF

En la figura 3.22 se observa el espectro eléctrico de los cuatro canales multiplexados por SCM, tanto en el lado del transmisor como del receptor, los mismos que se encuentran en las frecuencias: 2.4, 5.8, 10.8 y 18 GHz. Como conclusión se determina que los resultados obtenidos en la simulación son coherentes con los presentados por Jalil Mustafa en su artículo [1], verificando una correcta simulación de RoF.

Tabla 3.3: Parámetros de simulación para el sistema GPON-ARoF

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Tasa de bit DL	5 Gbps	Tasa de bit UL	5 Gbps
No. bits	16384	Muestras por bit	16
Potencia de láser	-5 a 20 dBm	Longitud hasta splitter	3 Km
RF DL	2.665 GHz dB	RF UL	2.635 GHz
$\lambda_{DL}$	1552.5 nm	$\lambda_{UL}$	1551 nm
No. sub-portadoras OFDM	512	No. puntos FFT	1024
Longitud última milla	0.5-30 Km	Tasa símbolo	Tasa bit / No. bits QAM

### 3.3.3. Inserción de A-RoF en una red GPON

Una vez comprobada la implementación de la red GPON y del sistema RoF, se realiza un esquema que involucre ambas tecnologías. Se pretende evaluar la eficiencia de una red FTTH ante la inserción de la tecnología RoF, por lo cual se toma un canal RF y se lo adapta a la red diseñada. Como la red GPON-FTTH es bidireccional, de igual manera se realiza un esquema RoF bidireccional.

Conforme la tabla 3.3, se propone que la tecnología opere en la longitud de onda de 1550 nm, por lo cual se precisa de un multiplexador del lado transmisor. En el lado receptor se necesita un filtro para separar las longitudes de onda del servicio GPON (1490 nm) y RoF. Por lo tanto, el equipo que se coloque en CO tendrá los componentes mostrados en la figura 3.24, donde se observa que la frecuencia para el enlace de descarga es 193.1 THz (1552.52 nm), mientras que para el enlace carga es 193.3 THz (1550.91 nm). La aplicación de la tecnología está orientada principalmente para la implementación de redes 5G, por lo cual, se simulan dos señales RF mediante SCM asumiendo dos BS que operan a frecuencias de 2.665 GHz y 5.665 GHz. Sin embargo, por motivos de simplificación, ya que los resultados son similares, se procede a mostrar resultados con 2.655 GHz. De todas formas, el sistema completo simulado y las capturas para la frecuencia de 5.665 GHz se presenta en el apéndice A.

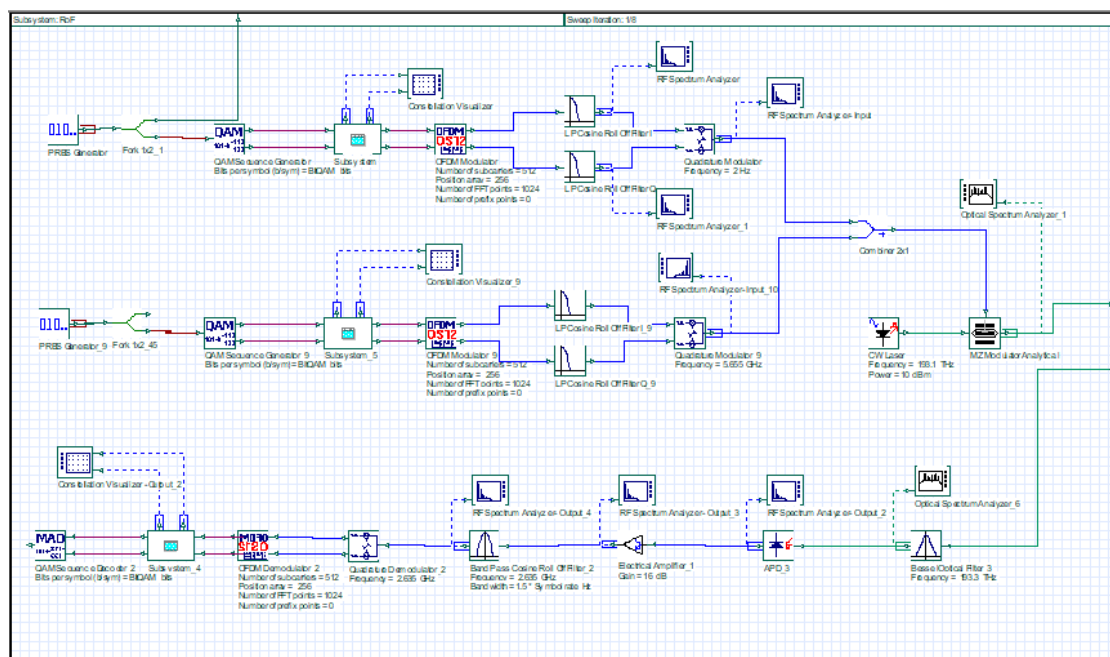


Figura 3.24: Equipo transmisor de tecnología RoF

Ante los cambios, la nueva CO quedaría como la mostrada en la figura 3.25. La ODN no se vería afectada en cuanto a infraestructura por la tecnología RoF, por lo cual se mantiene.

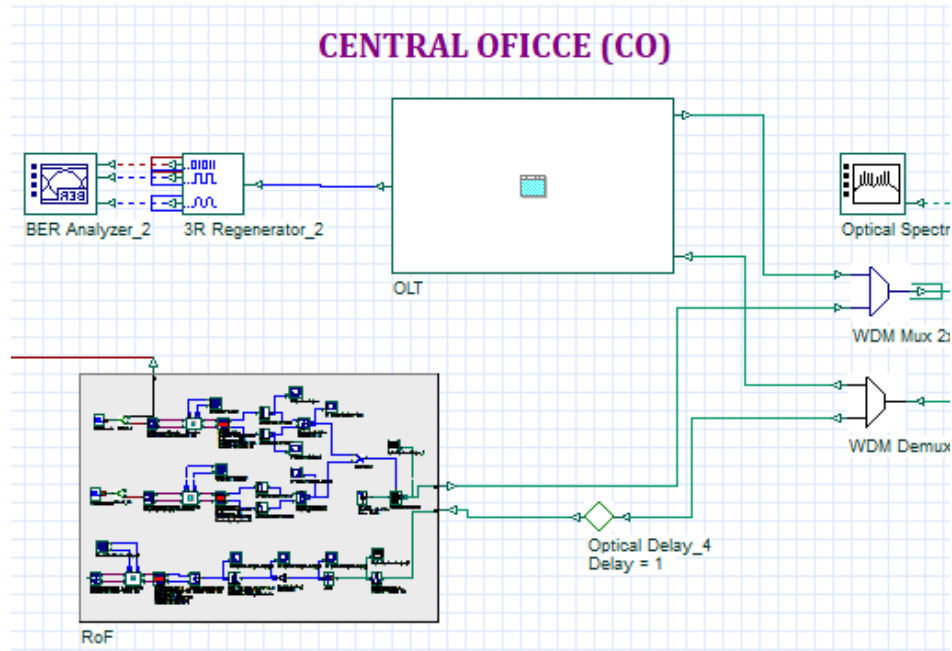


Figura 3.25: GPON-RoF

Para establecer un enlace con el equipo de usuario “*User Equipment (UE)*” y tratándose de una red móvil, las BS deben establecer un enlace con el último nivel de *splitter* de la red GPON, lo cual se logra mediante la fibra. Por lo cual del lado receptor, se tendría lo mostrado en la figura 3.26, donde se puede observar los enlaces de carga y descarga, al igual que los *enlaces físicos* mediante el cual se conectan los usuarios.

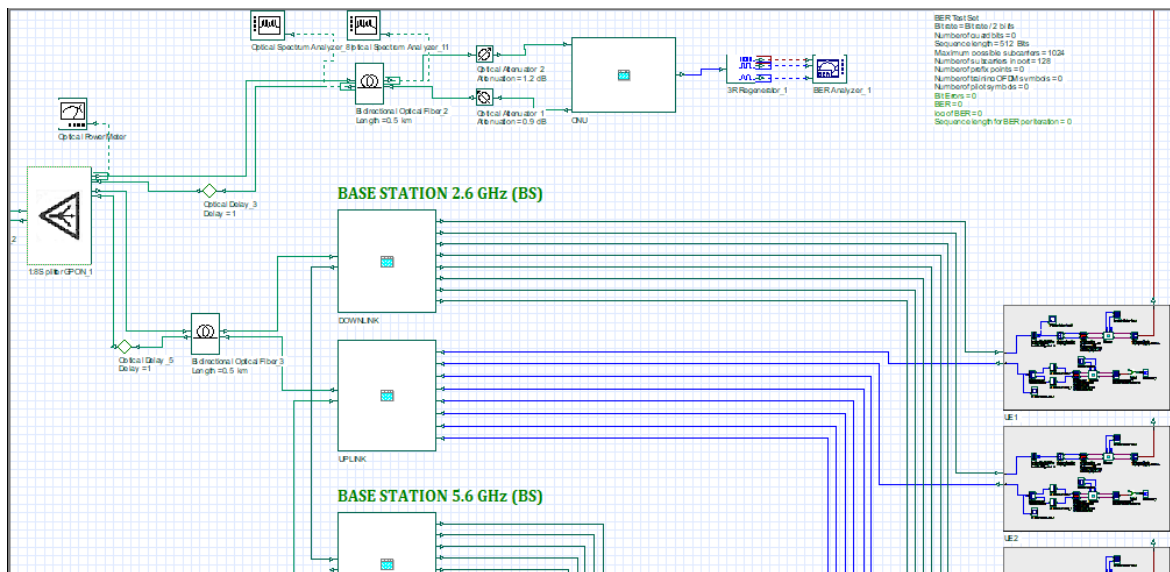
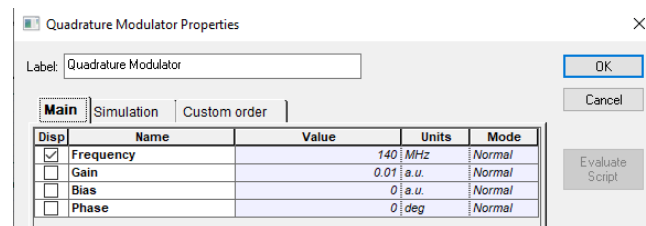


Figura 3.26: Salida de los servicios GPON y RoF

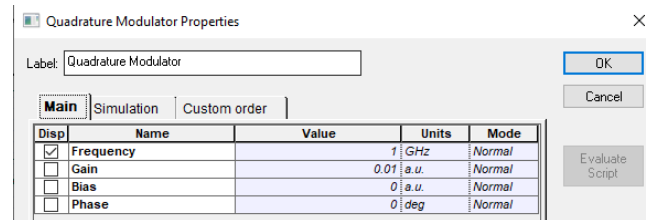
Como se explicó en el capítulo 2, dentro de A-RoF existen dos versiones las cuales se detallan a continuación.

### 3.3.3.1. IFoF sobre GPON

Con base en la explicación anterior referente al transmisor RoF, es necesario recalcar que la versión del mismo dependerá de cual es la frecuencia que viaja en la portadora óptica. Por ende para lograr frecuencia intermedia sobre fibra “*Intermediate Frequency Over Fiber (IFoF)*” se debe configurar el modulador de cuadratura a IF (véase figura 3.27a), para posteriormente realizar un aumento de frecuencia en la BS.



(a) Configuración de modulador de cuadratura a IF



(b) Configuración de modulador de cuadratura a 1 GHz para simulación

Figura 3.27: Configuración de parámetro de simulación para modulador de cuadratura

Sin embargo, debido a limitaciones del propio software, no se pueden realizar simulaciones a bajas frecuencias. Esto se debe a una zona muerta dentro del conversor electro-óptico, la misma que se observa en la figura 3.28, teniendo un valor aproximado de 250 MHz. Por lo cual, conforme se aprecia en la figura 3.27b la frecuencia más baja que se puede simular es 1 GHz, considerando el BW que se genera al transmitir los datos.

En cuanto al procesamiento de la señal en BS, es necesario un supra-convertidor para aumentar la frecuencia para poder radiarla. Por lo tanto, el sistema que conforma la BS es el que se muestra en la figura 3.29.

La constitución del subsistema supra-convertidor, es el que se muestra en la figura 3.30, está conformado por un BPF para eliminar cualquier interferencia, seguido de un oscilador configurado a la frecuencia de radiación deseada, la misma que deberá ser RF. Para la simulación se elige una frecuencia de 10 GHz.

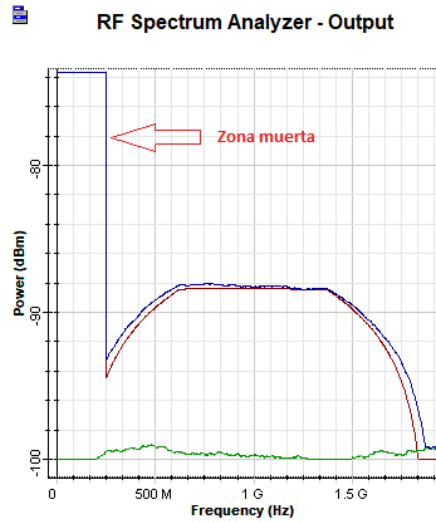


Figura 3.28: Espectro eléctrico en la salida del conversor óptico-eléctrico

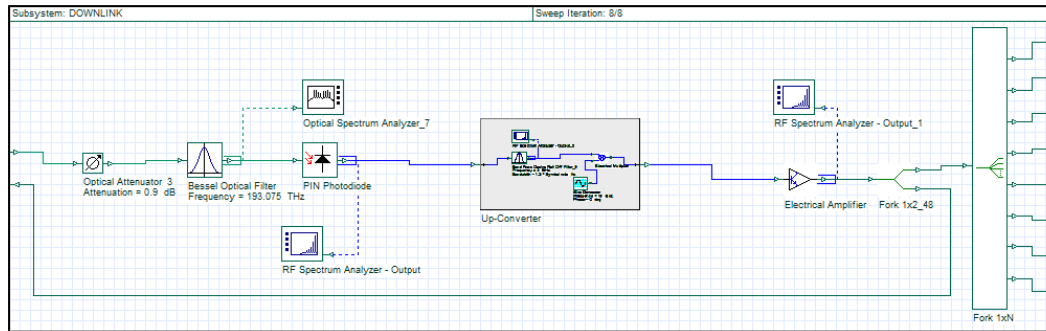


Figura 3.29: Sistema de bloques de estación base

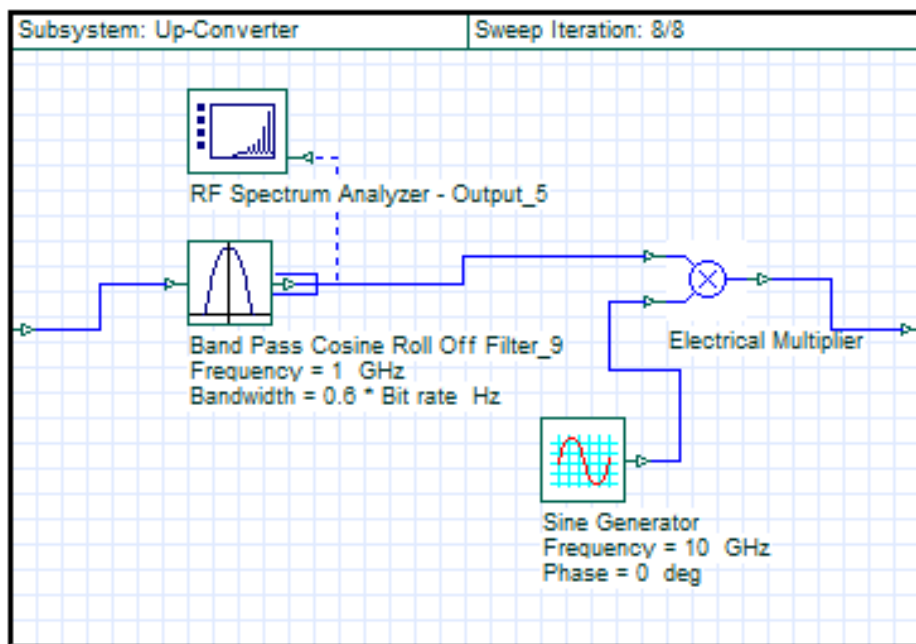


Figura 3.30: Diagrama de bloques del supra-conversor

Una vez aumentada la frecuencia, se procede a enlazarla con los terminales de usuarios mediante un elemento del simulador llamado fork. Este elemento permite la división de la señal sin tener pérdidas, el fork utilizado es uno de 8 salidas, se simula la conexión de 8 equipos de usuario (UE) a la estación base (BS), siendo esto mediante enlaces físicos virtuales.

En el lado del receptor, se procede a realizar un proceso de conversión descendente, para un posterior procesamiento de la señal IF y obtención de los bits enviados. El correspondiente diagrama de bloques es el mostrado en la figura 3.31.

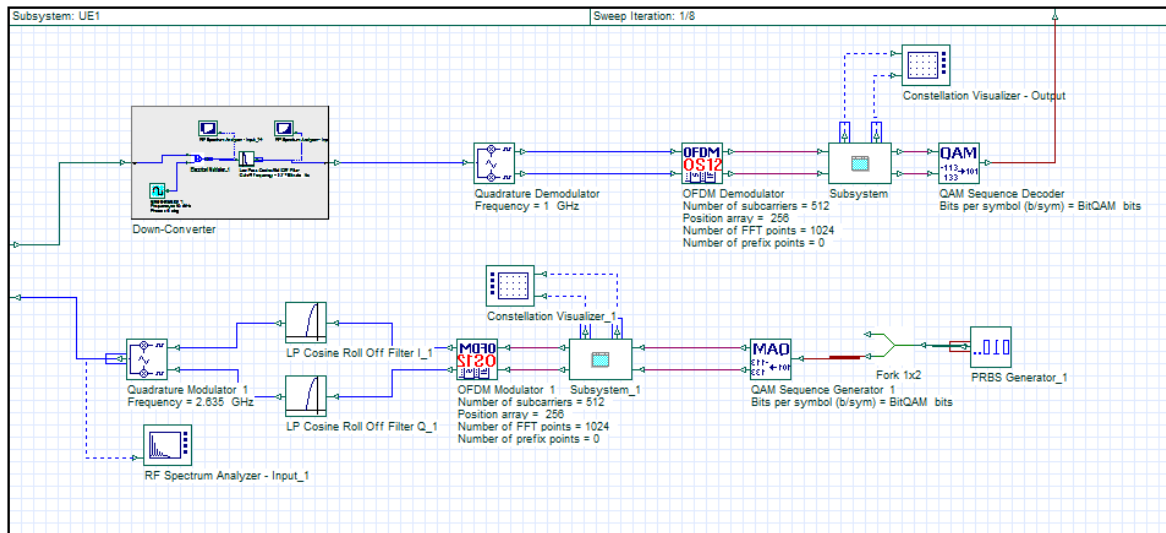


Figura 3.31: Diagrama de bloques del receptor

El convertidor descendente consta de un oscilador a la misma frecuencia del transmisor y luego un BPF con el cual se obtiene el espectro deseado. Luego esta señal se debe procesar normalmente para obtener los bits transmitidos, con lo cual el diagrama queda como el visualizado en la figura 3.32.

Ahora como se aprecia en la figura 3.31, al tratarse de una red bidireccional, se debe realizar los enlaces correspondientes. Si bien el transmisor es el mismo que el explicado anteriormente, se debe tener en cuenta que ahora se tienen múltiples usuarios, por lo cual es necesario realizar una gestión en el enlace de carga.

Para que la BS maneje múltiples usuarios y conforme lo establece la 3GPP respecto al acceso múltiple en 5G, se emplea acceso múltiple por división de tiempo “*Time Division Multiple Access (TDMA)*”. Para lo cual, cada usuario transmitirá su información durante un espacio de tiempo, por lo cual dentro del simulador el subsistema que se encarga de realizar dicha asignación quedaría como el mostrado en la figura 3.33.

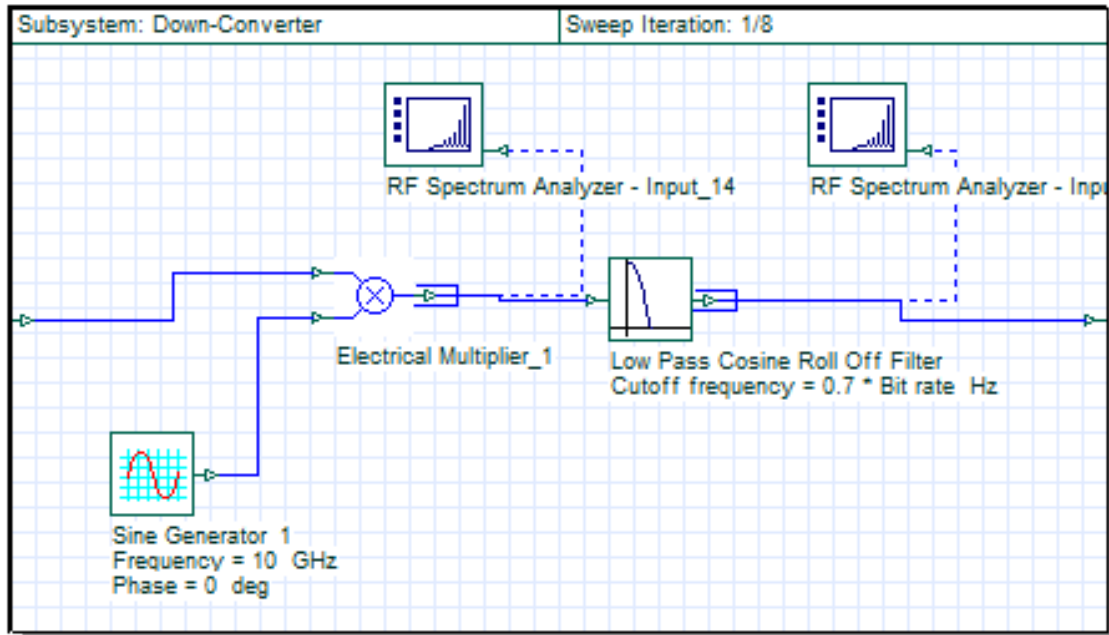


Figura 3.32: Diagrama de bloques del convertor descendente

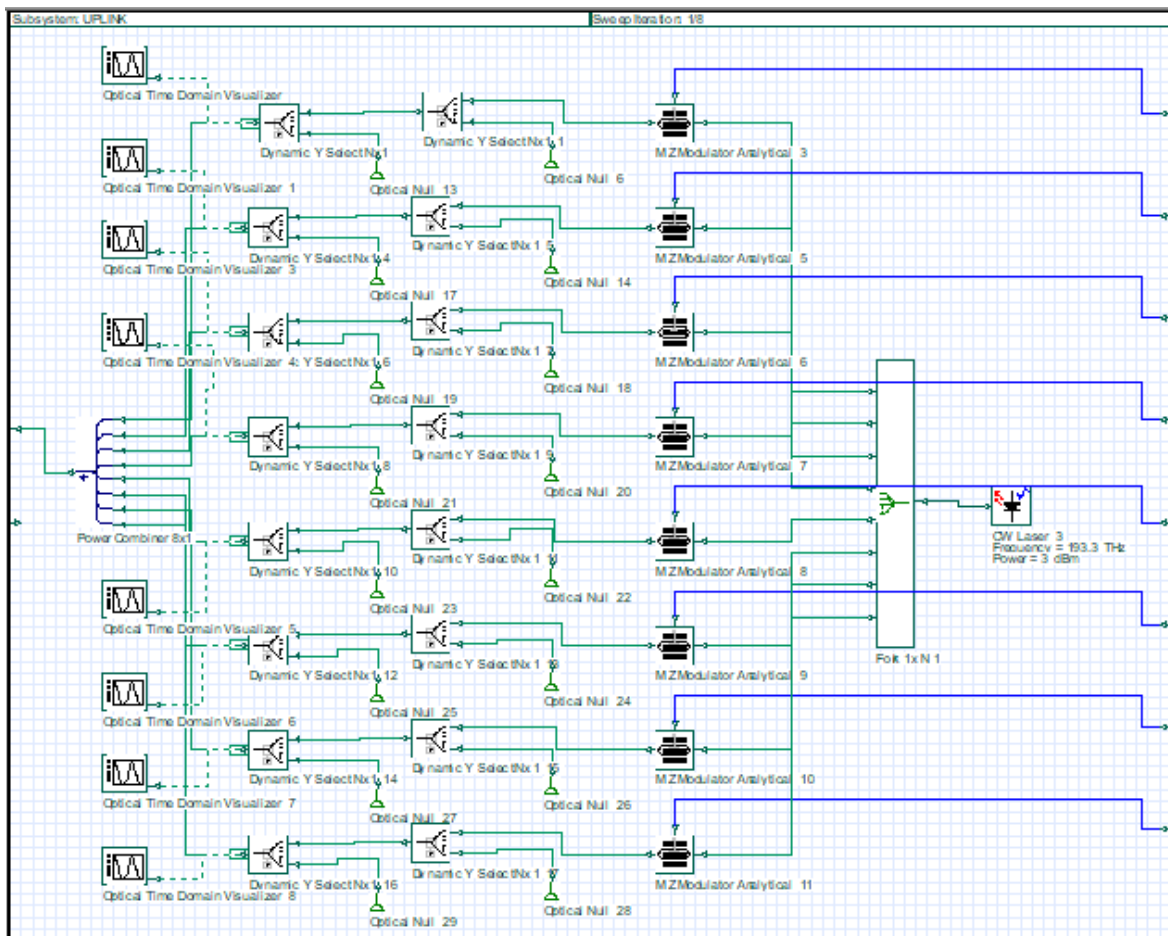
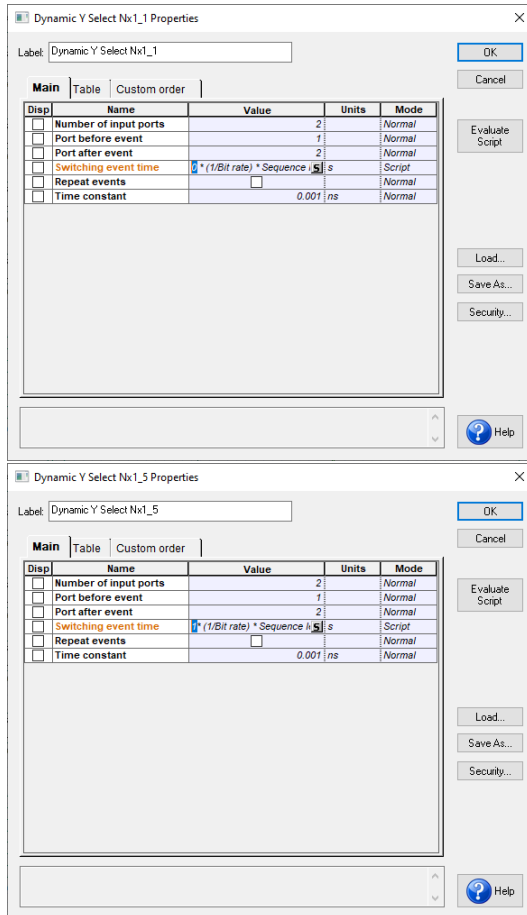


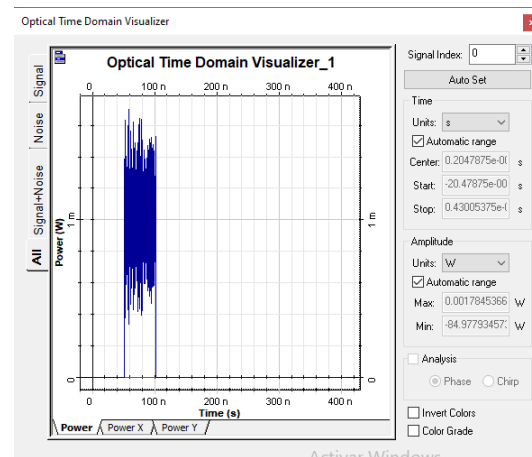
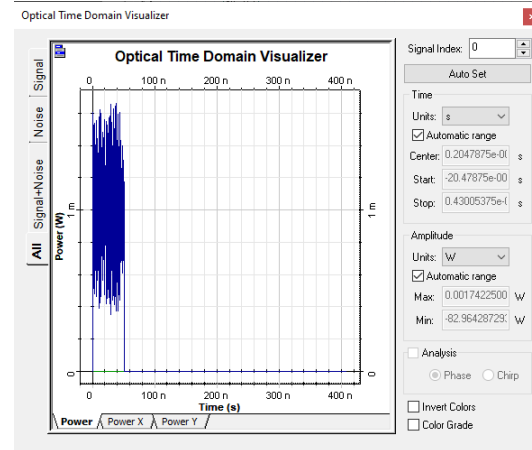
Figura 3.33: Diagrama de bloques del subsistema de carga



Para lograr el manejo de múltiples usuarios es necesario utilizar un bloque llamado *Dynamic Select*, el cual permite seleccionar entre los diferentes puertos con base en un evento de cambio, es decir, emplea un puerto antes y otro puerto después del evento. La configuración para dos usuarios y su señal en el tiempo de la transmisión, se puede observar en la figura 3.34.



(a) Configuración de slot de tiempo para cada usuario



(b) Señal en el tiempo transmitida para cada slot

Figura 3.34: Configuración de TDMA en el subsistema UL

La formulación matemática del evento para cada usuario se explica a continuación. Para el primer *Dynamic Select* se emplea la condición

$$timeSlot \times \frac{1}{Bitrate} \times \frac{Sequencelength}{No.usuarios}$$

mientras que para el segundo *Dynamic Select* del mismo usuario se usa,

$$timeSlot \times \frac{1}{Bitrate} \times \frac{Sequencelength}{No.usuarios} + \frac{Timewindow}{No.usuarios}$$

donde después cada señal se combina y se envía a través de la fibra hasta llegar a la CO.

### 3.3.3.2. RFoF sobre GPON

Para realizar RFoF es necesario hacer ciertas modificaciones a IFoF. En primera instancia, la frecuencia seleccionada en el modulador de cuadratura debe ser alta, en el orden de GHz. Para la presente simulación se han seleccionado las frecuencias de 2.65 GHz y 5.65 GHz, por lo que el transmisor quedaría como lo mostrado en la figura 3.35.

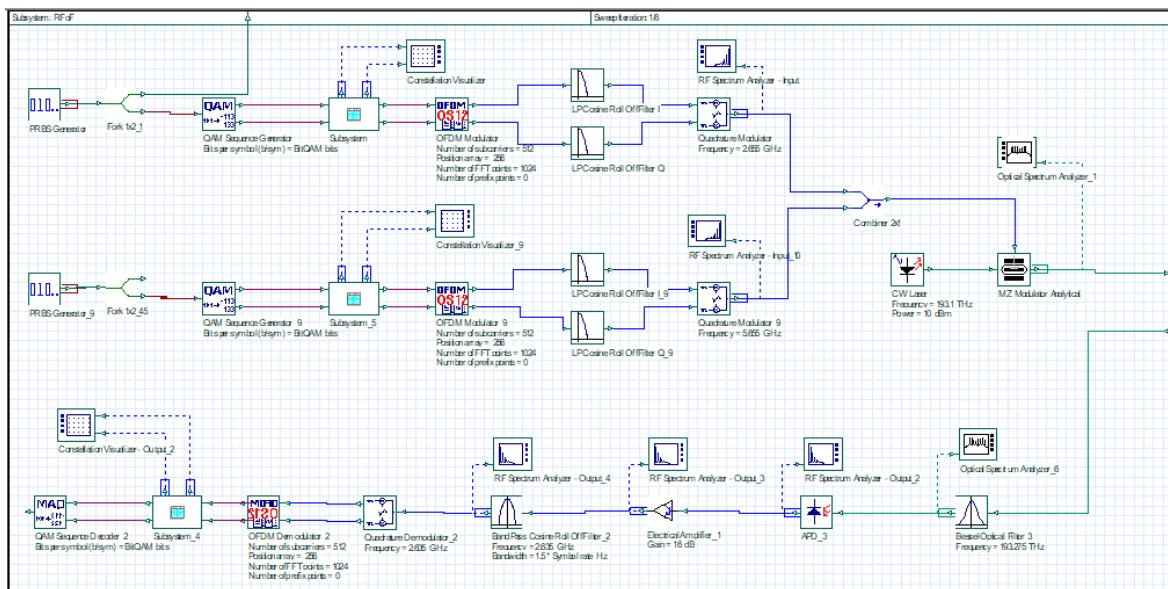


Figura 3.35: Transmisor para RFoF

Otro elemento que se modifica es la BS, en la cual ya no se necesitará un supra-conversor debido a que la misma frecuencia que acompaña la portadora óptica, se amplifica y conecta directamente con el UE. El subsistema de descarga de datos modificado se muestra en la figura 3.36.

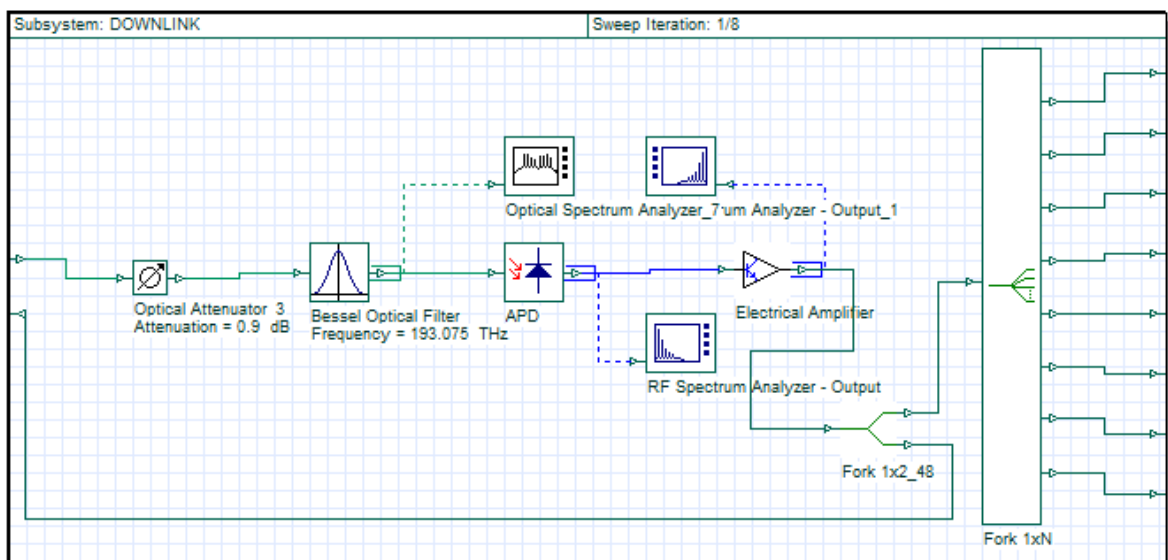


Figura 3.36: Subsistema de descarga para RFoF

Tabla 3.4: Parámetros de simulación para el sistema GPON-DRoF

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Potencia láser 4-QAM	2 dBm	Potencia láser 16-QAM	5 dBm
Potencia láser 64-QAM	10 dBm	Resolución ADC	6 bits

Así mismo, la complejidad del subsistema receptor también disminuye, ya que se elimina el elemento conversor descendente y en su lugar se debe colocar un BPF para eliminar cualquier señal no deseada; después el resto del procesamiento se mantiene, de igual manera para el enlace de carga, ya explicado en la sección anterior.

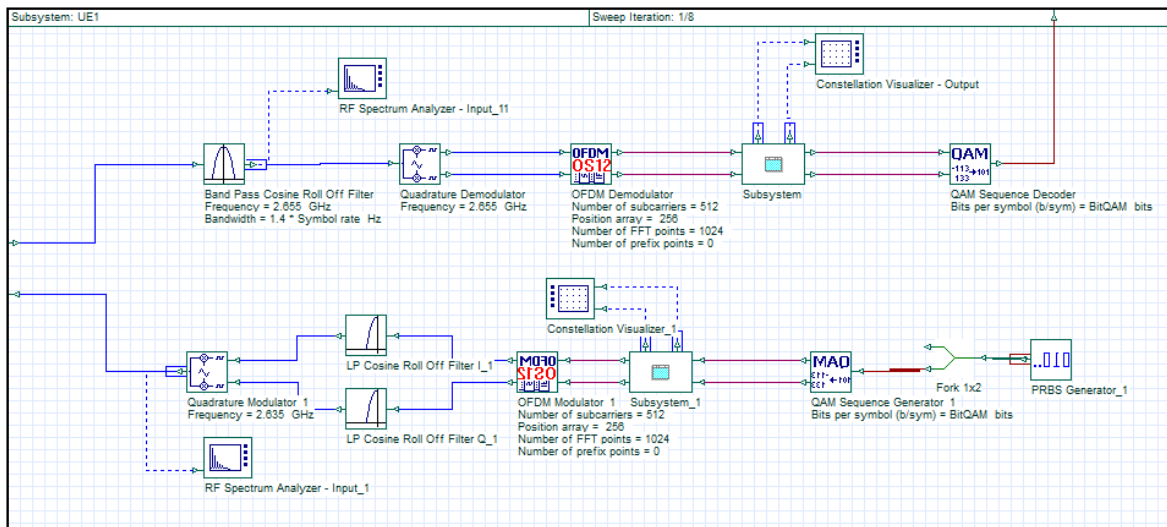


Figura 3.37: Subsistema receptor de RFoF

### 3.3.4. Inserción de D-ROF en una red GPON

Para realizar D-RoF se parte de A-RoF, ya que consta de una etapa de digitalización de la señal RF modulada. Por lo tanto, mediante un convertidor analógico-digital “Analog-to-Digital Converter (ADC)” en el lado del transmisor se obtiene lo mostrado en la figura 3.38. Los parámetros de inicio son modificados para obtener una señal óptima en el receptor, estos se presentan en la tabla 3.4.

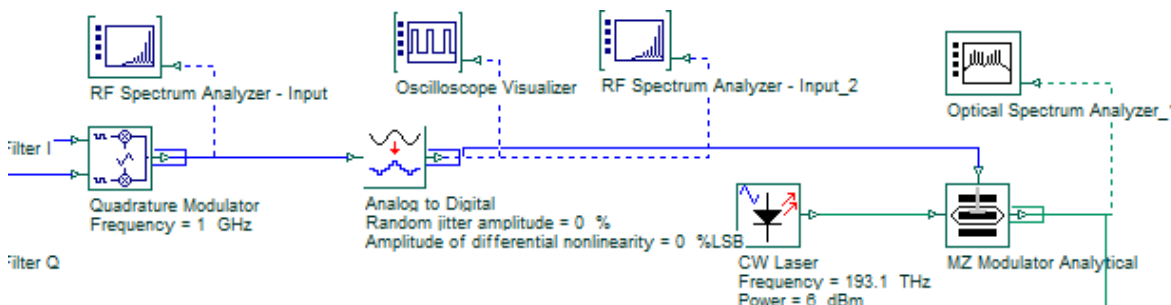


Figura 3.38: Digitalización de señal RF en el lado del transmisor

Esta digitalización produce en la entrada del modulador lo mostrado en la figura 3.39, cabe

mencionar que se emplea una resolución de 6 bits, teniendo así  $2^6 = 64$  niveles. Es importante considerar los niveles, ya que permite disminuir la dispersión de los bits enviados, lo mismo que se mostrará más adelante.

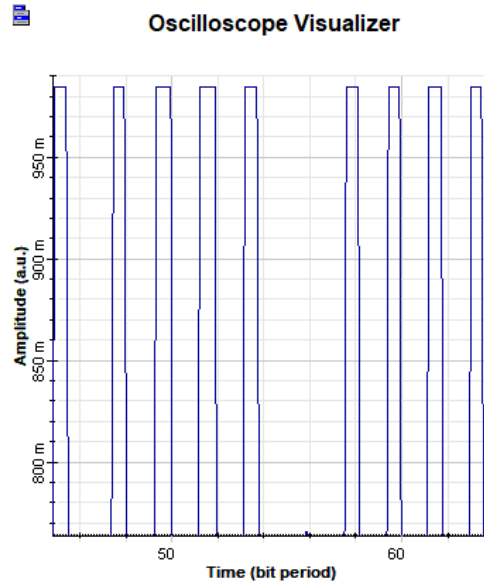


Figura 3.39: Bits de la señal digitalizada

Para el caso del receptor, se debe emplear un convertidor digital-analógico “*Digital-to-Analog Converter (DAC)*”, tal como se muestra en la figura 3.40.

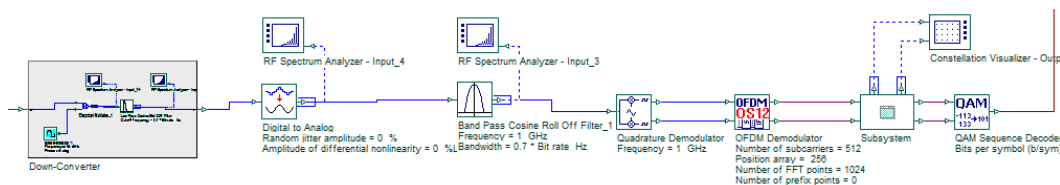


Figura 3.40: Conversión digital-analógica en el lado del receptor

### 3.4. Conclusiones

En el diseño de la red GPON los parámetros configurados en los elementos de la sección de transmisión (CO), la ODN y la recepción (ONUs) permitieron observar el comportamiento del simulador así como de la red GPON dando resultados favorables según lo esperado; dada las características de distancia y nivel de *splitter* planteadas en este capítulo se obtuvo un factor de calidad ( $Q=22$ ) óptimo para la red lo cual deja ver que los elementos de la red y los elementos de medición funcionan de correctamente.

De igual forma al validar una red RoF mediante el diseño y características planteadas en otros trabajos, como se observa en las figuras obtenidas para todos los casos, el diagrama de constelación refleja una recepción adecuada con pocas pérdidas lo cual se parece a los datos obtenidos en los trabajos tomados como referencia.



La implementación de **A-RoF** tanto en **IF** como en **RF** resultaron satisfactorias al poder tener una recepción adecuada tanto en **GPON** como para las estaciones base. Sin embargo se obtuvo un obstáculo al realizar **IFoF** ya que existe un punto ciego en el simulador donde se genera bits erróneos en el conversor debido a la utilización de frecuencias en el rango de los MHz, por lo que la frecuencia a usar para **IFoF** debe ser aproximadamente de 1 GHz en adelante para que no existan errores.

CAPÍTULO  
**4**

---

## Análisis de resultados

En este capítulo se analizan los resultados obtenidos con la simulación de **RoF** sobre una red **GPON**. Se presentan como parámetros de medición los espectros de las señales enviadas y recibidas, los diagrama de ojo, el factor de calidad, el diagrama de constelación y la tasa de error de bits **BER**; con estos parámetros se estima la eficiencia de la red tanto en el caso de **GPON** o de **GPON** conjuntamente con **RoF**,

En cada simulación se utiliza la misma tasa de bits en transmisión así como la misma ventana de 1552 nm, sin embargo se considera a la modulación de amplitud en cuadratura **QAM** como la modulación principal dada su mejora en los resultados de desempeño, los cuales superan a otras modulaciones analógicas como **AM** o **FM** y también a la modulación digital de **QPSK**. En cada simulación realizada se muestra los resultados obtenidos al variar su modulación entre **4-QAM**, **16-QAM** y **64-QAM** para comparar su comportamiento y como influye los diferentes tipos de modulación con la señal recibida.

### 4.1. Resultados de A-RoF en red GPON

Como se menciona en la sección 2.3.3 del presente trabajo, **A-RoF** ofrece dos técnicas con la cuales se puede implementar, la primera es la técnica de frecuencia intermedia sobre fibra “*Intermediate Frequency Over Fiber (IFoF)*” y la segunda es radio frecuencia sobre fibra “*Radio-Frequency over Fiber (RFoF)*” de las cuales se analiza su eficiencia y resultados.

#### 4.1.1. IFoF

Se configuran los parámetros de simulación de tal forma que lo único que varía entre ellas son la modulación utilizada obteniendo como resultado:

##### 4.1.1.1. 4-QAM

Primero se realiza el análisis de la señal en **DL**, para ello una vez ejecutada la simulación, se visualiza el analizador de frecuencia a la salida del sistema de transmisión, previo a la conversión

Electrical to Optic (E/O), el espectro obtenido se presenta en la figura 4.1a en la que se puede observar que nuestra *frecuencia intermedia* es de 1 GHz con un ancho de banda  $BW \approx 2,5 GHz$ .

Esta señal es modulada por el MZM y se transmite en la fibra dando origen al espectro mostrado en la figura 4.1b donde se aprecia la portadora óptica de la señal GPON en la ventana de  $\lambda = 1490 nm$ , mientras que en  $\lambda = 1552 nm$  se encuentra la tecnología IFoF; de esta última se aprecia una amplificación de la señal la cual muestra sus bandas laterales acordes con la teoría.

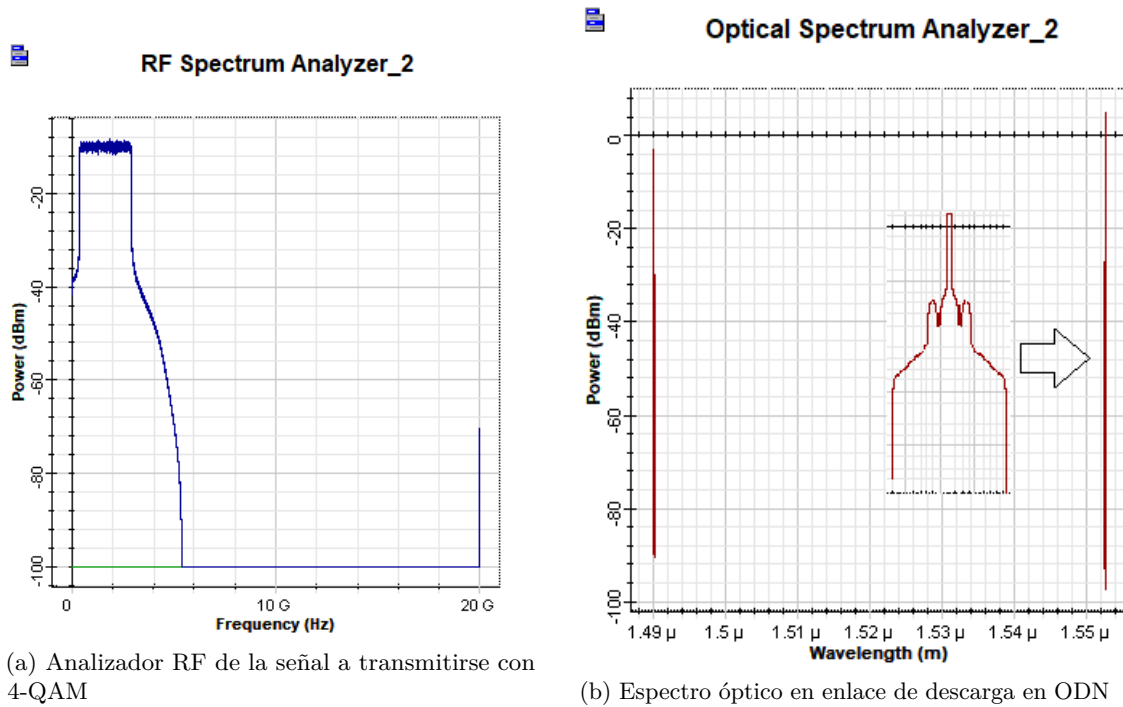


Figura 4.1: Señales eléctricas y ópticas transmitidas desde CO

La señal llega a la BS y es aquí donde se realiza el proceso de supra-conversión UC a una frecuencia de 10 GHz para poder irradiarla generando el espectro mostrado en la figura 4.2a. Se observa en la figura las bandas laterales generadas al ser multiplicadas por el oscilador. En el lado receptor se realiza el proceso de conversión descendente Down-Converter (DC) obteniendo la señal en su frecuencia original es decir 1 GHz como se ve en la figura 4.2b.

En el receptor, se procesa la señal y se obtiene el diagrama de constelación mostrado en la figura 4.3a, donde se aprecia una dispersión aceptable de los bits. En cuanto al factor de calidad Q de la red GPON ante la inserción de IFoF, el mismo que se puede observar en la figura 4.3b, se encuentra en un valor de 10,18 dB el cual está en el rango de recepción óptima.

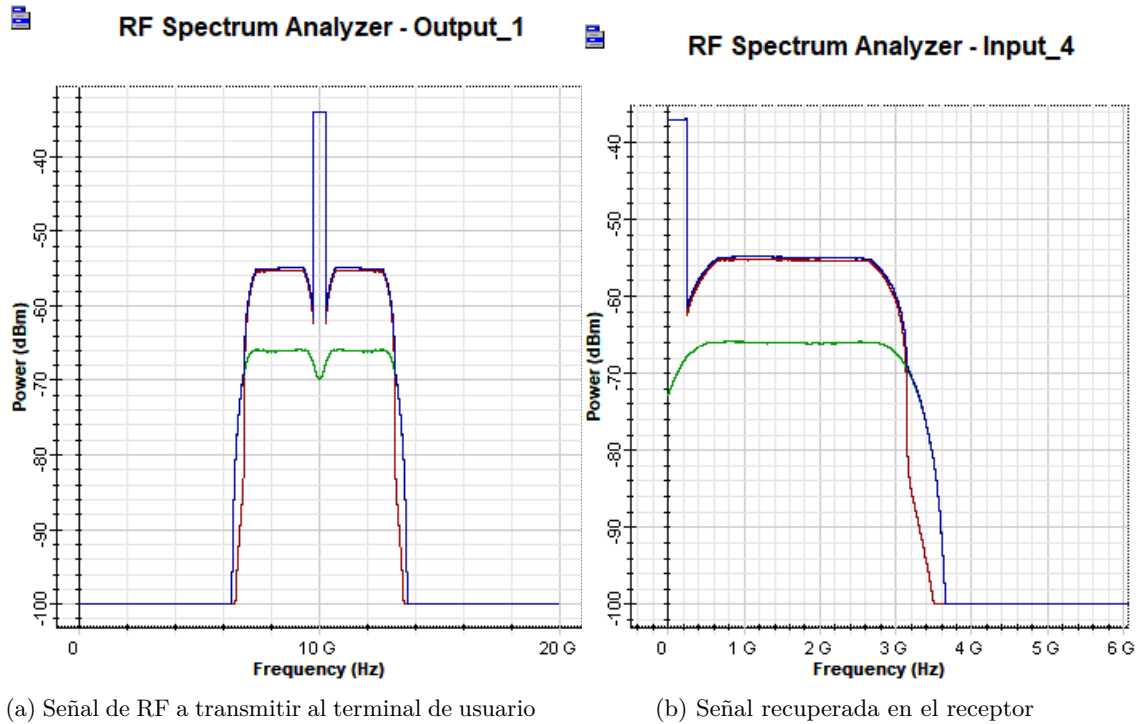


Figura 4.2: Proceso de supra-conversión y conversión descendente

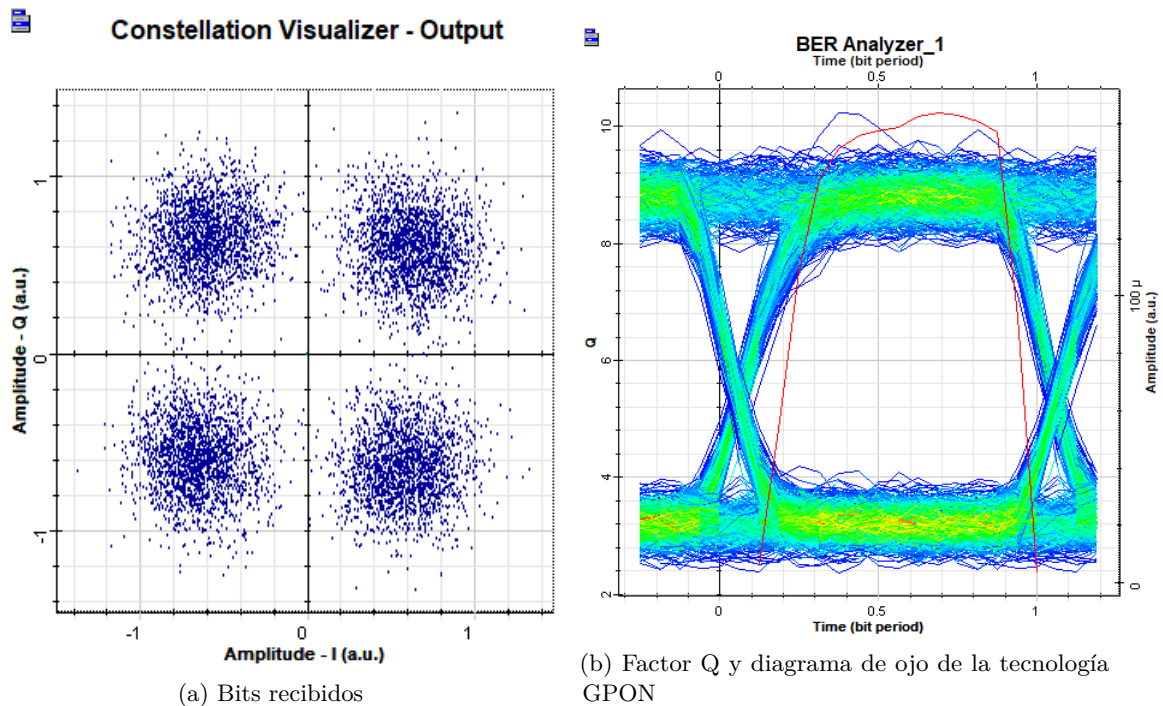


Figura 4.3: Recuperación de bits y eficiencia de la red

Para el enlace de subida, el proceso es similar, sin embargo, las frecuencias seleccionadas tanto para RF como para la portadora óptica cambian, los datos viajan a una frecuencia de 2.635 GHz



en la ventana de  $\lambda = 1556 \text{ nm}$ ; esto se observa en la figura 4.4 y la figura 4.4b respectivamente. En esta última figura se puede apreciar las portadoras ópticas a 1310 nm y 1556 nm, correspondiente a GPON-carga y IFoF-carga.

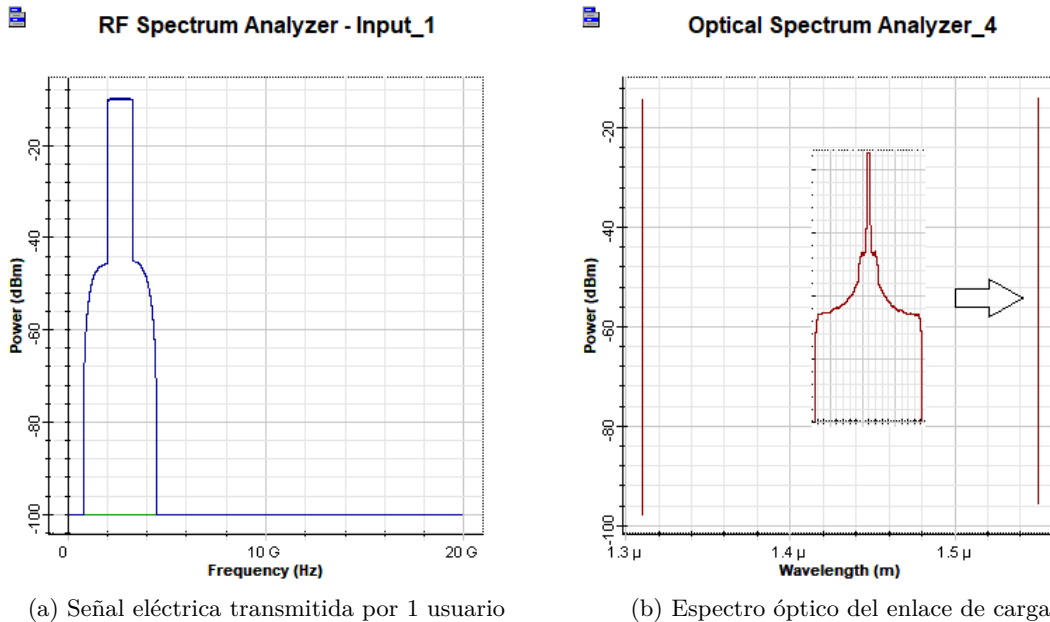


Figura 4.4: Señales enviadas en enlace de carga

La factor de calidad del enlace de carga de GPON es de  $Q = 6,18 \text{ dB}$ , como se ve en la figura 4.5 el diagrama de ojo muestra ruido en la señal en comparación con el enlace de descarga, esto se debe al manejo de múltiples usuarios y la baja potencia de láser en BS.

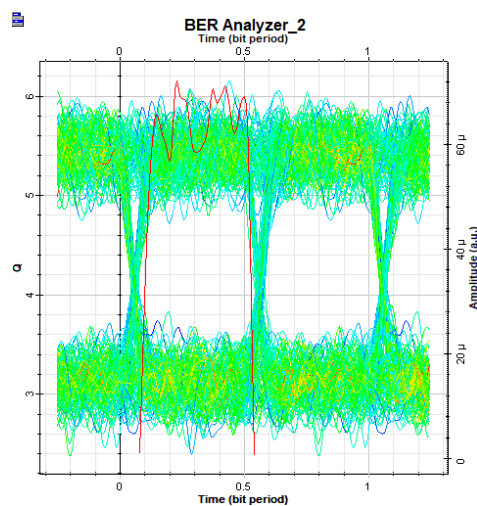


Figura 4.5: Diagrama de ojo del enlace de carga en red GPON

#### 4.1.1.2. 16-QAM

Con la nueva modulación se tienen los espectros eléctrico y óptico mostrados en la figura 4.6 respectivamente. Se observa una disminución del ancho de banda  $BW \approx 600 \text{ MHz}$  en el espectro

eléctrico, de igual manera en el espectro óptico se disminuye las banda laterales.

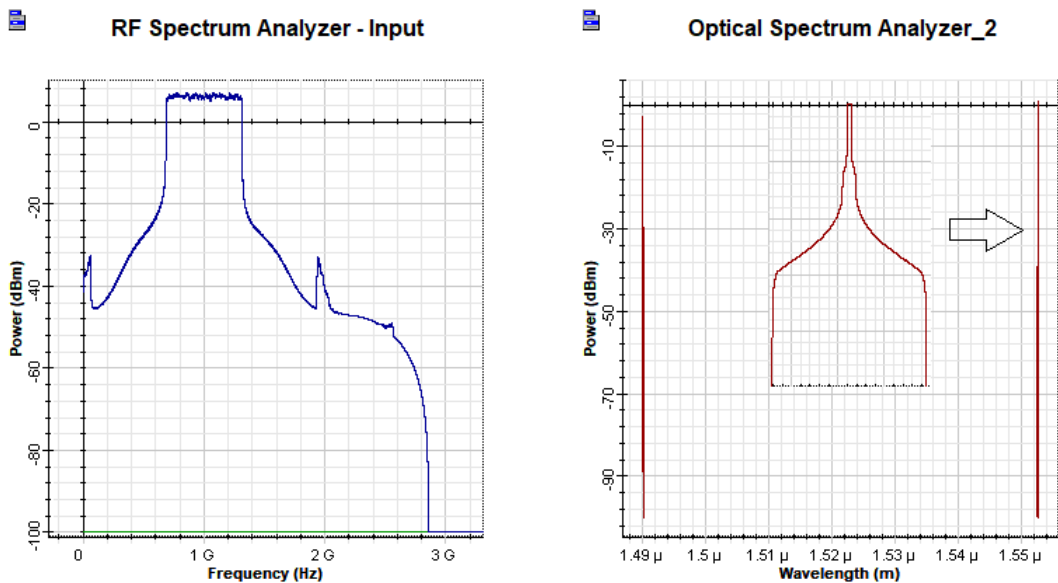


Figura 4.6: Señales eléctricas y ópticas transmitidas desde CO

El proceso de supra-conversión lleva la frecuencia a 10 GHz, mientras que el convertor descendente la regresa a 1 GHz como se muestra en la figura 4.2. Los bits recuperados presentan menor dispersión en comparación con la modulación de 4-QAM como se ve en la figura 4.8a, de igual forma se presenta una mejora en el ruido presente en la señal como se muestra en el diagrama de ojo de la figura 4.8 dando un factor de calidad  $Q = 10,32$  dB.

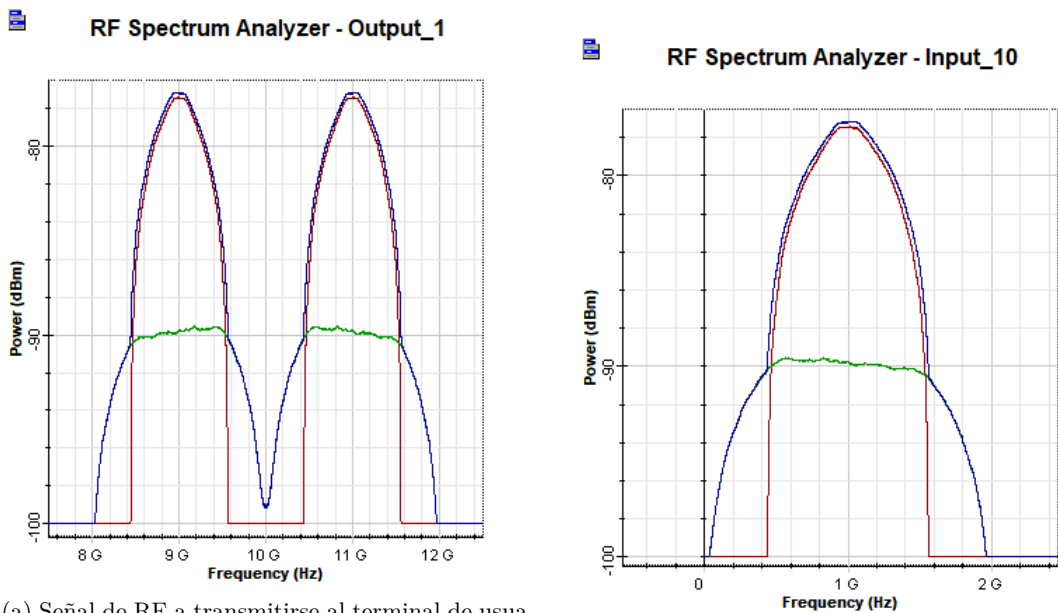


Figura 4.7: Proceso de supra-conversión y conversión descendente

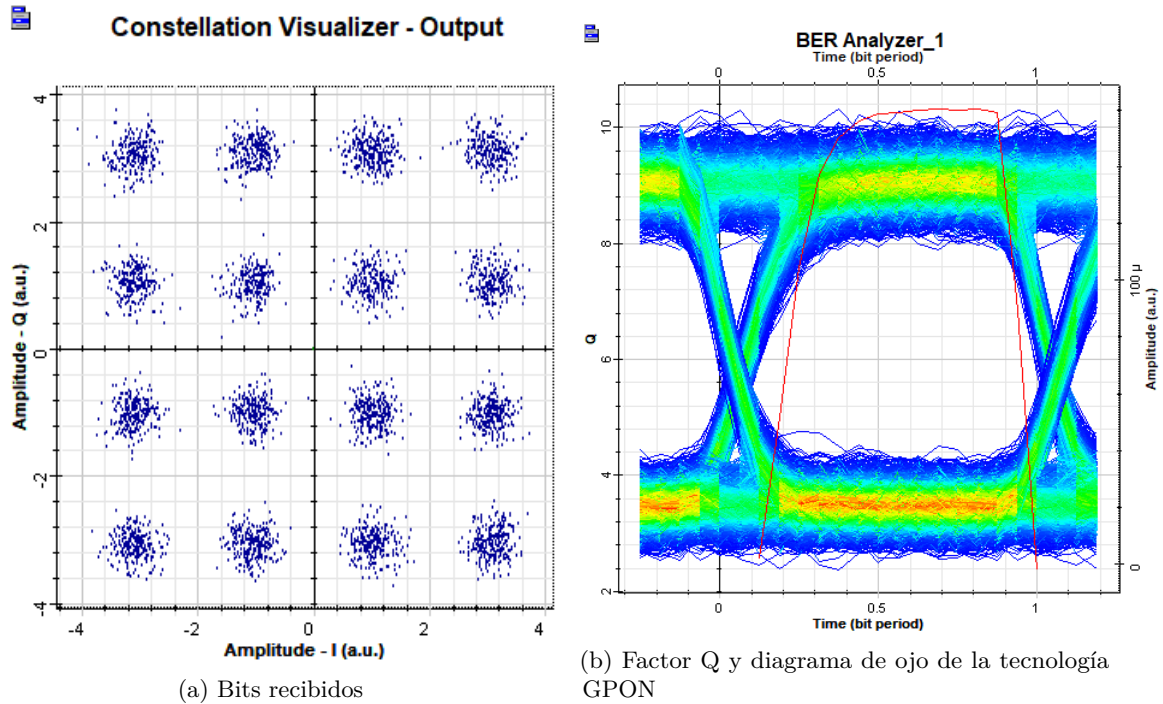


Figura 4.8: Recuperación de bits y eficiencia de la red

En el enlace de carga se aprecia en su diagrama de ojo una señal similar a la anterior como se ve en la figura 4.9a en donde además se tiene un factor  $Q = 6,14$  dB que es cercano al del caso anterior. El espectro óptico permanece similar al caso anterior con una modulación de 4-QAM.

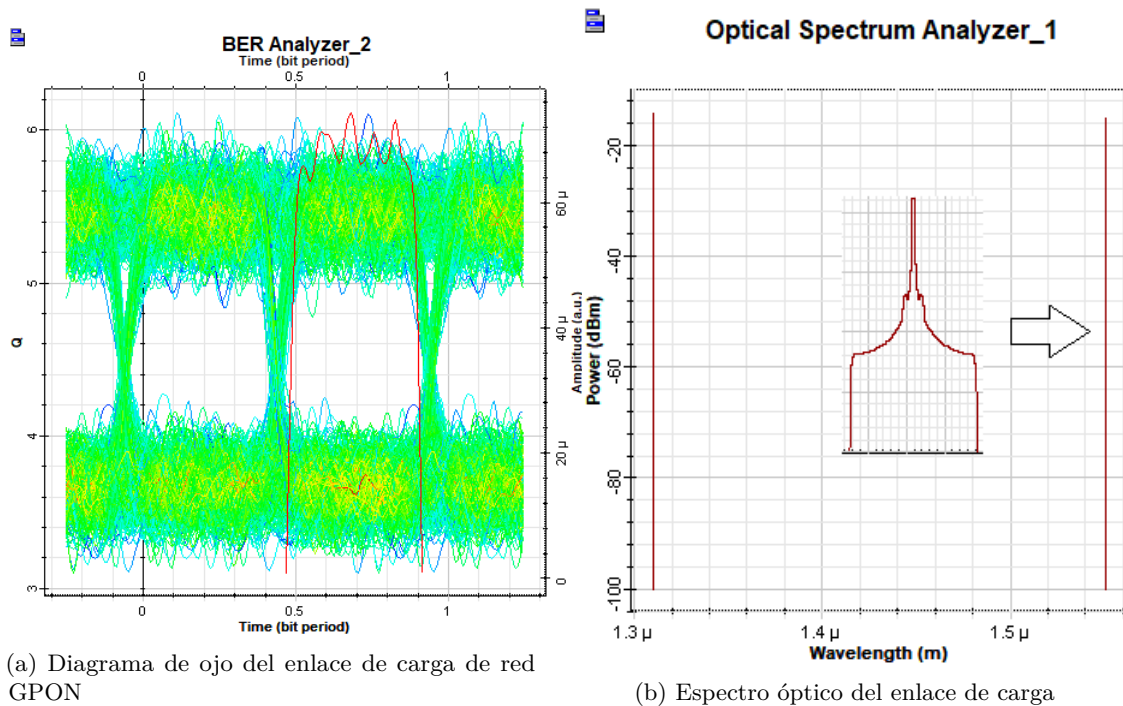


Figura 4.9: Señales enviadas en enlace de carga

### 4.1.1.3. 64-QAM

Para esta modulación se obtienen el espectro eléctrico y óptico de la señal enviada y se los muestra en la figura 4.10. De esta señal al realizar el UC se lleva a la señal a 10 GHz con sus bandas laterales mostrada en la figura 4.11a, mientras que en el receptor se realiza la conversión descendente obteniendo una señal de 1GHz como se presenta en la figura 4.11b.

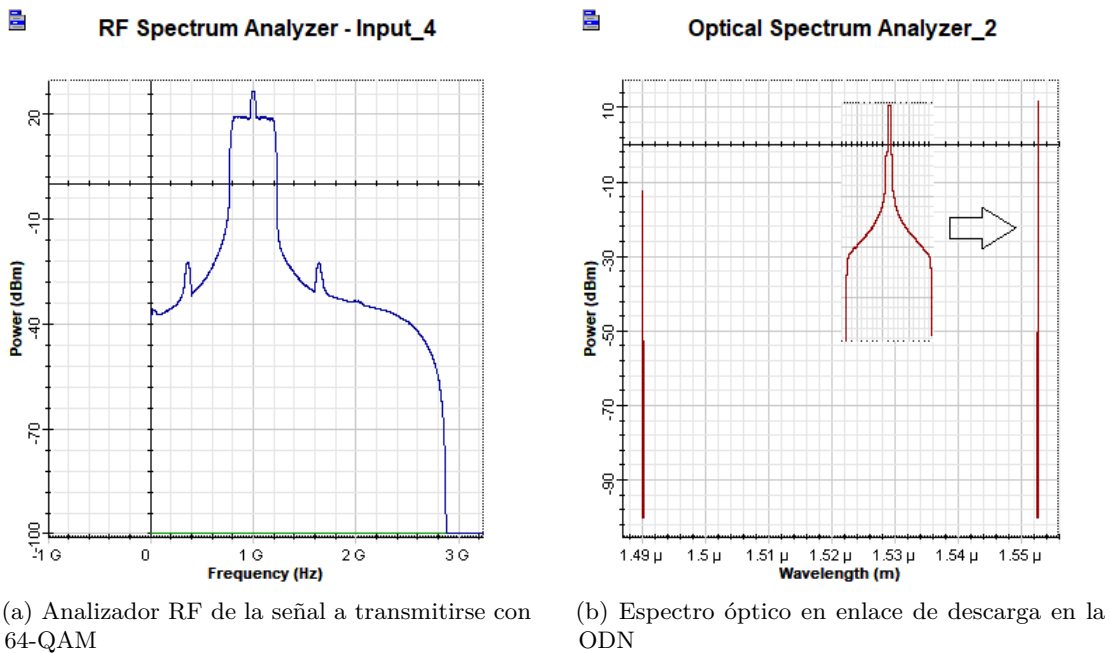


Figura 4.10: Señales eléctricas y ópticas transmitidas desde CO

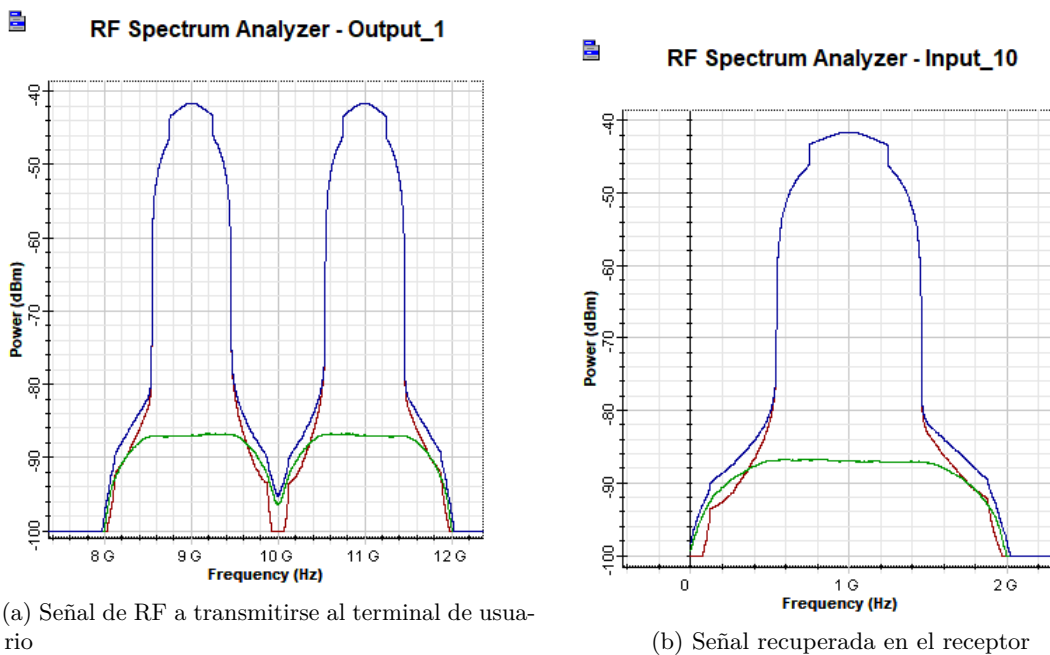


Figura 4.11: Proceso de supra-conversión y conversión descendente

La señal recuperada es mejor respecto a las anteriores modulaciones, como se observa en el diagrama de constelación de la figura 4.12a en donde los bits recuperados tienen casi nula dispersión, de igual forma el diagrama de ojo mostrado en la figura 4.8b presenta una señal con poco ruido y el factor de calidad aumenta siendo este un factor  $Q = 10,38$  dB.

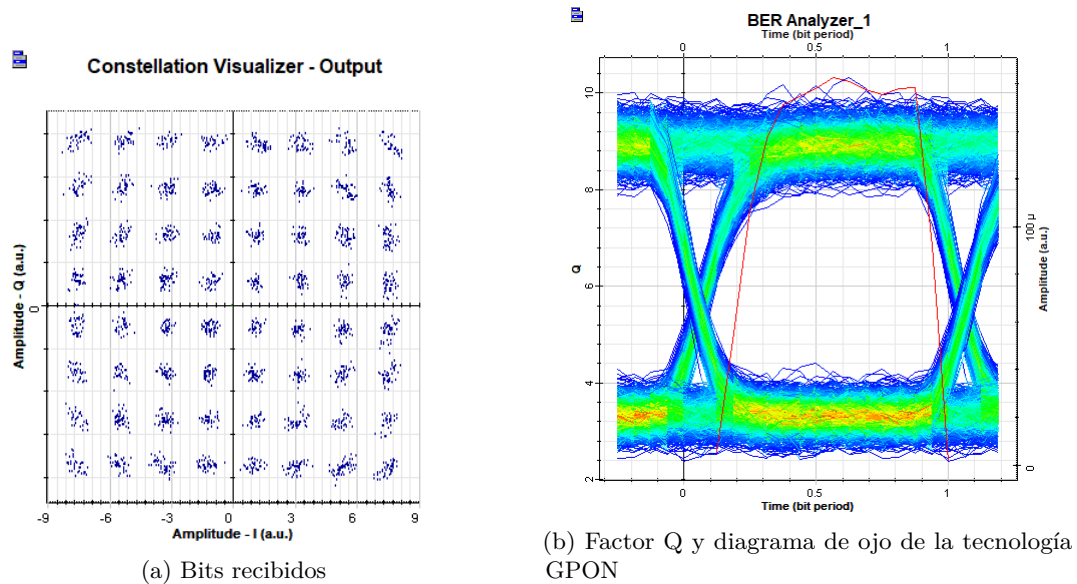


Figura 4.12: Recuperación de bits y eficiencia de la red

Para el enlace de UL, la figura 4.13a muestra el diagrama de ojo conjuntamente con el factor de calidad  $Q$ , que tiene un valor de 7,41 dB, conjuntamente se presenta el espectro óptico en la figura 4.13b.

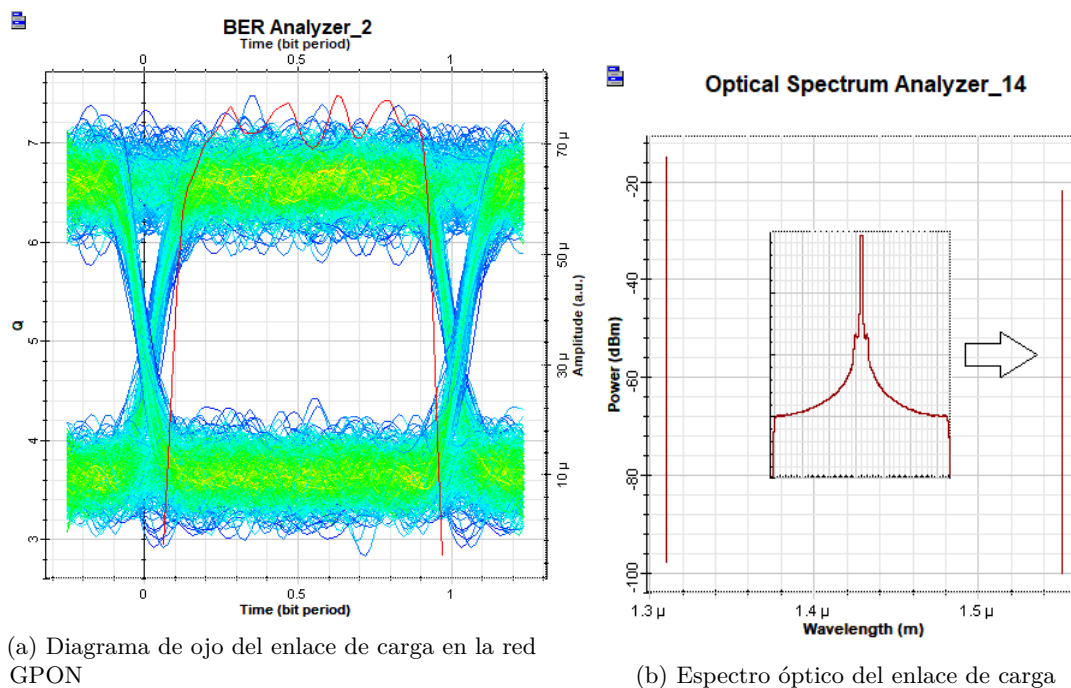


Figura 4.13: Señales enviadas en enlace de carga

### 4.1.2. RFoF

Para esta técnica en las simulaciones se envía una señal en RF a través de la fibra, se extraen las mismas gráficas y parámetros que para IFoF, se presenta los resultados y se compara el comportamiento entre las 3 modulaciones de QAM que se han determinado previamente.

#### 4.1.2.1. 4-QAM

La señal RF generada en el transmisor se muestra en la figura 4.14a, donde se aprecia que posee un ancho de banda  $BW = 2,5GHz$ . La señal óptica que viaja en la ODN enviada por el MZM se muestra en la figura 4.14b.

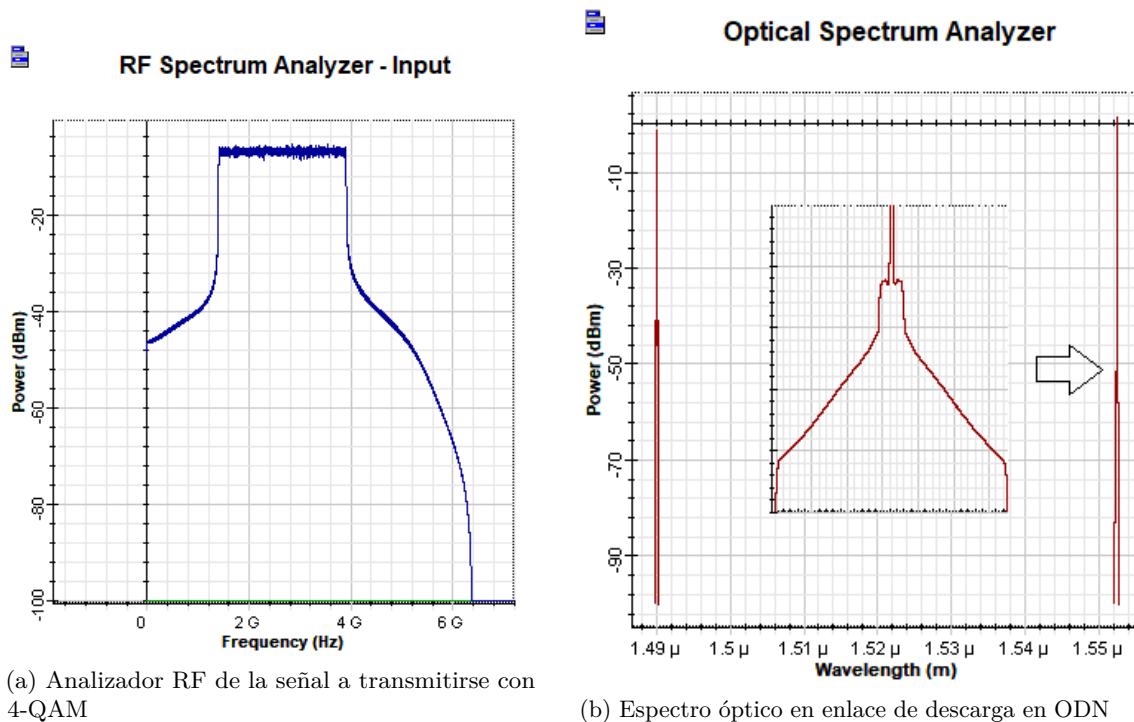


Figura 4.14: Señales eléctricas y ópticas transmitidas desde CO

La señal recibida por la BS es enviada hacia el receptor donde se procesa y se obtienen los bits con los que se realiza el diagrama de constelaciones la cual presenta dispersión, esto se puede observar en la figura 4.15a. Se evalúa la eficiencia de la red GPON mediante el valor del factor de calidad  $Q = 13,61$  dB, el diagrama de ojo obtenido se muestra en la figura 4.15b en donde se aprecia una señal con poco ruido, estas características son coherentes con el diagrama de constelación obtenido.

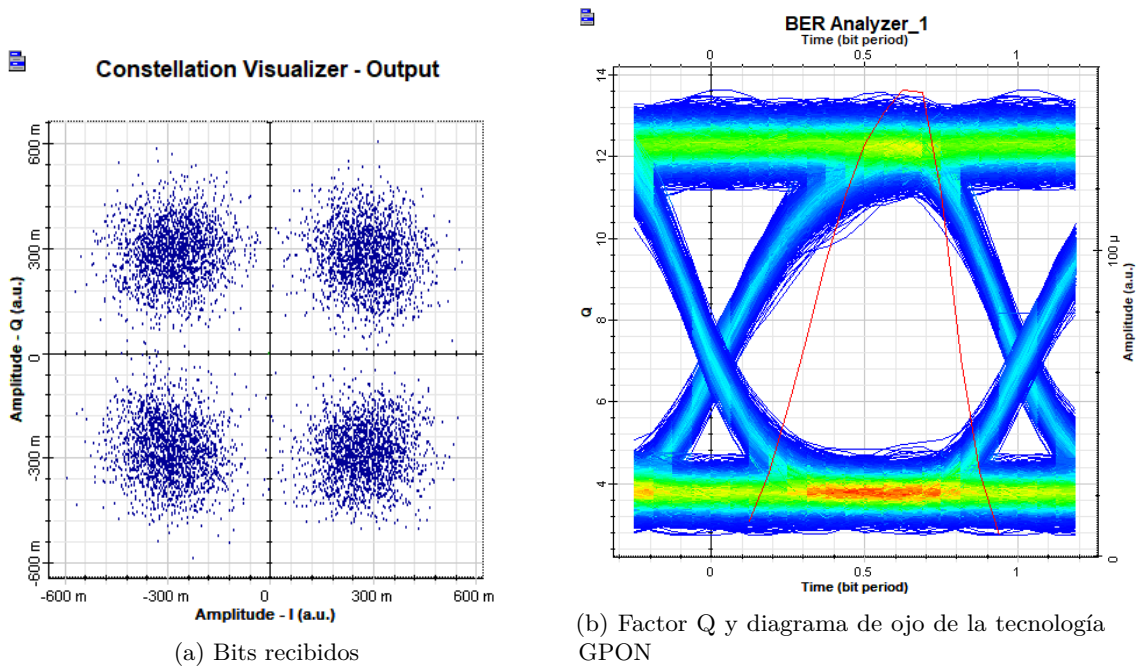


Figura 4.15: Recuperación de bits y eficiencia de la red

En el enlace de carga, la información que transmiten los usuarios es visualizada mediante los espectros ópticos de GPON y RFoF que se muestran en la figura 4.16b. Esta información al llegar al receptor presenta una señal con mucho ruido y un factor de calidad  $Q = 7,7$  dB como se observa en el diagrama de ojo mostrado en la figura 4.16a.

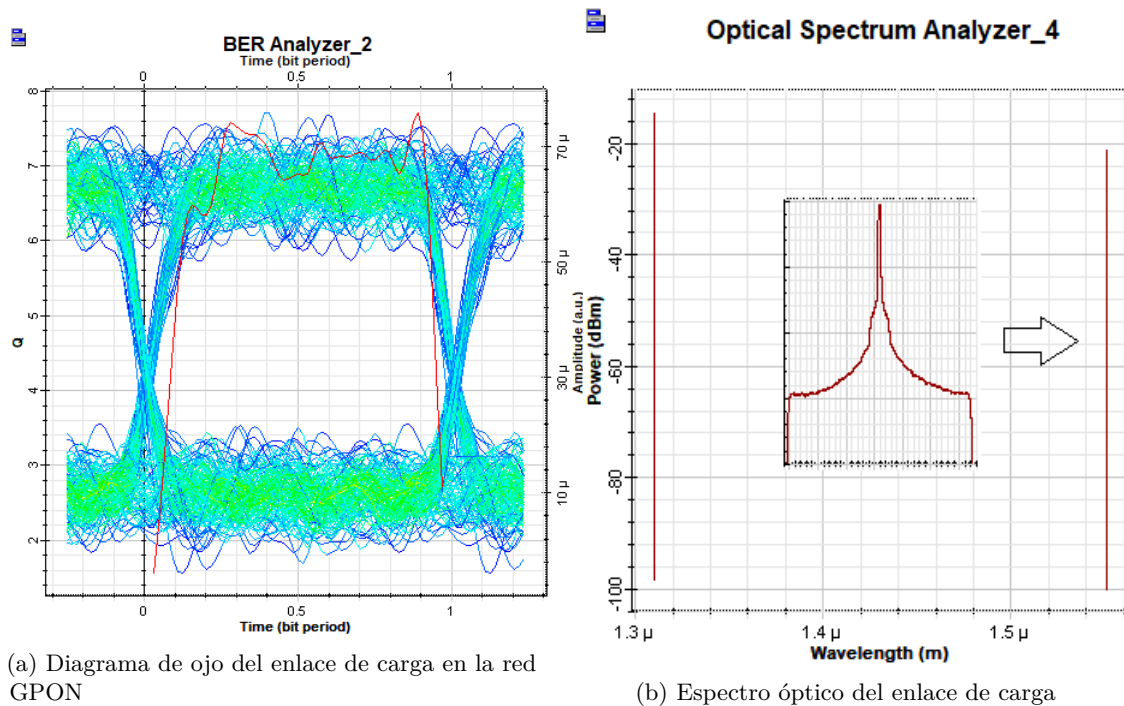


Figura 4.16: Señales enviadas en enlace de carga

#### 4.1.2.2. 16-QAM

Con una modulación de 4 bits por símbolo, en el enlace DL se obtienen un espectro eléctrico y óptico como los que se muestran en la figura 4.17. La señal recibida por el usuario genera un diagrama de constelación con menor dispersión de los bits en comparación con el caso anterior como muestra la figura 4.18a; de igual manera el diagrama de ojo, que se presenta en la figura 4.18b, muestra mejoras en la señal receptada la cual tiene poco ruido y un factor de calidad  $Q = 13,65$  dB.

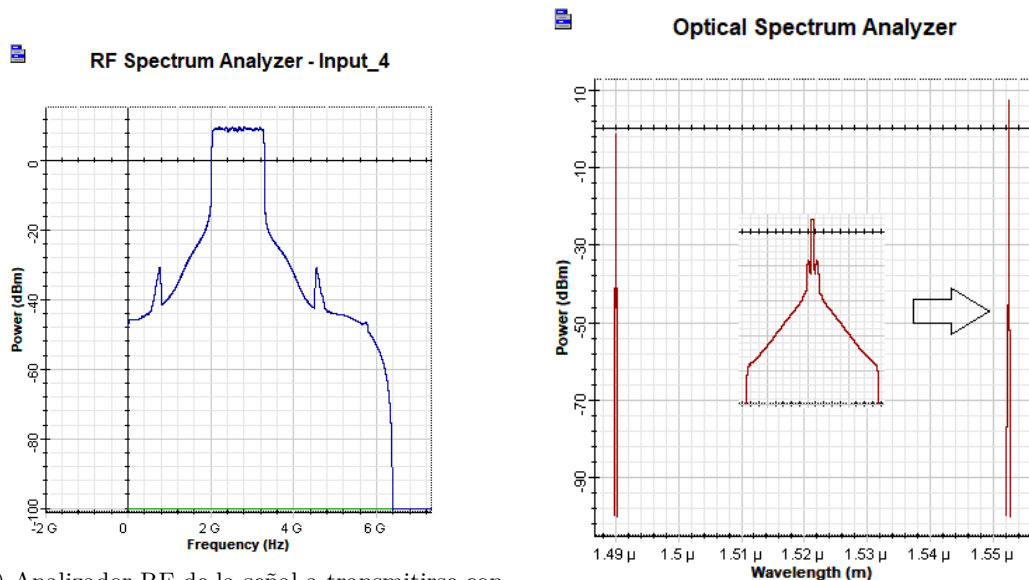


Figura 4.17: Señales eléctricas y ópticas transmitidas desde CO

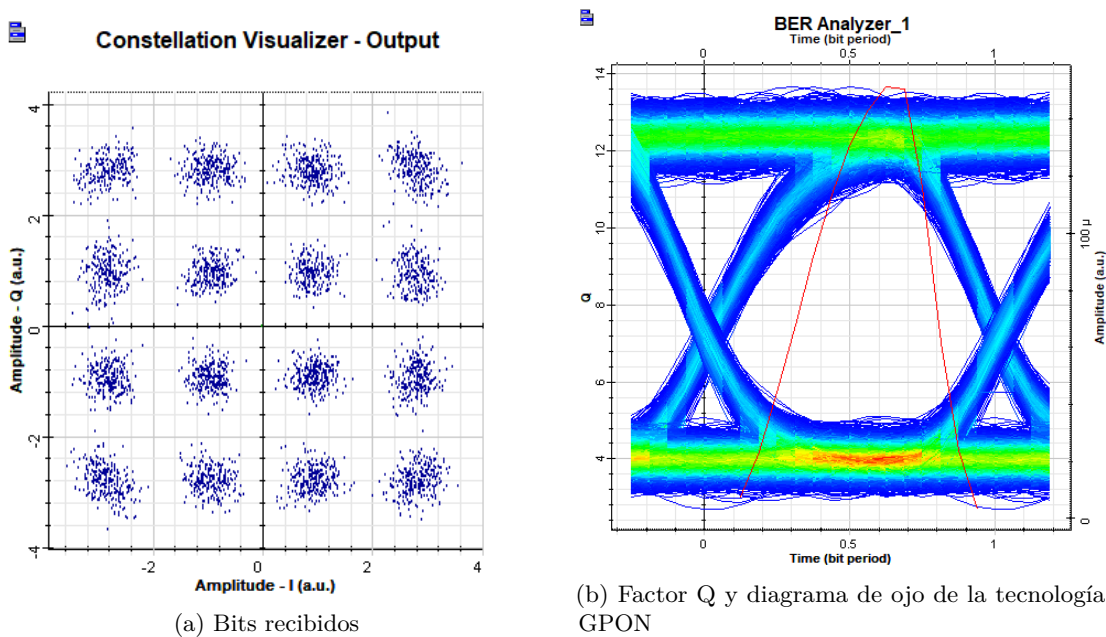
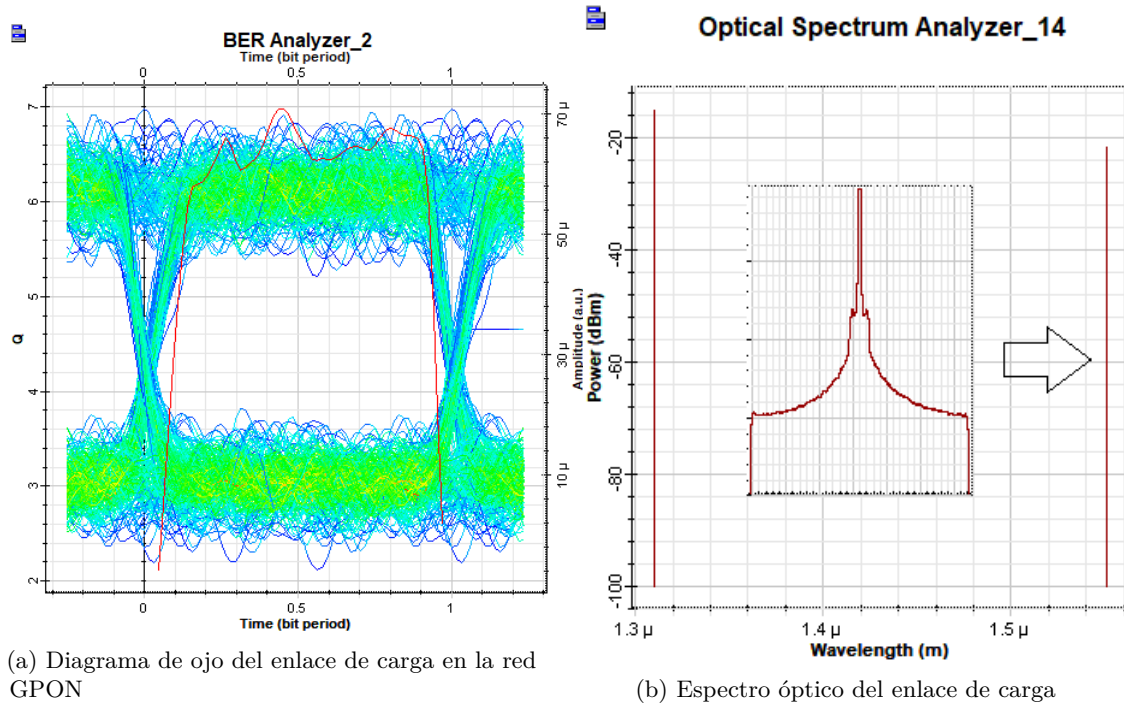


Figura 4.18: Recuperación de bits y eficiencia de la red



En el enlace [UL](#) se obtiene los resultados del estado del enlace mostrados en el diagrama de ojo que se ve en la figura 4.19a donde se muestra un factor  $Q = 6,9$  dB y la presencia de ruido en la señal. En cuanto a las portadoras ópticas, éstas se las puede divisar en la figura 4.19b.



(a) Diagrama de ojo del enlace de carga en la red GPON

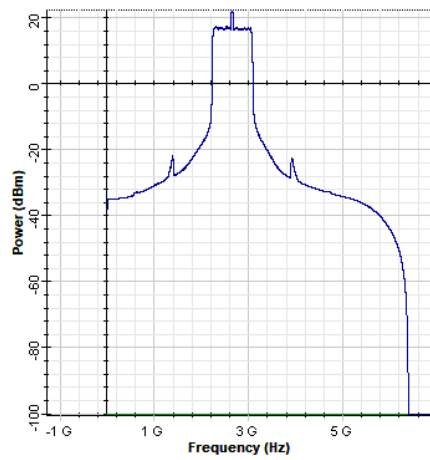
(b) Espectro óptico del enlace de carga

Figura 4.19: Señales enviadas en enlace de carga

#### 4.1.2.3. 64-QAM

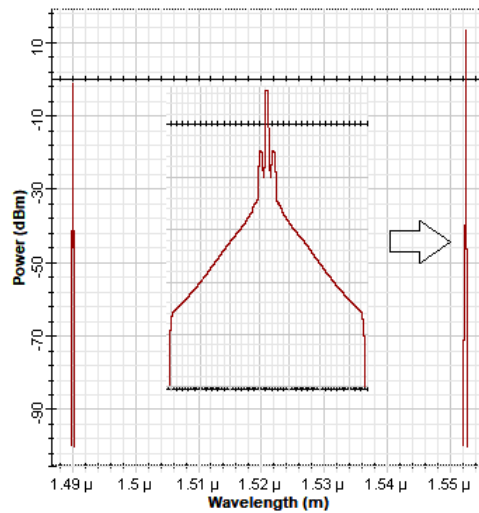
El espectro eléctrico generado con una modulación de 64-QAM se presenta en la figura 4.20a, aquí se observa un ancho de banda de  $BW \approx 800MHz$  mientras que las resultantes en el dominio óptico de la misma transmisión se puede observar en la figura 4.20b. Al recuperar la información se genera un diagrama de constelación con casi nula dispersión como se ve en la figura 4.21a, de esta señal receptada se obtiene el diagrama de ojo que se presenta en la figura 4.21b con poco ruido y un factor de calidad  $Q = 13,78$  dB, el cual es el valor más alto de las tres modulaciones simuladas.

RF Spectrum Analyzer - Input\_4



(a) Analizador RF de la señal a transmitirse con 64-QAM

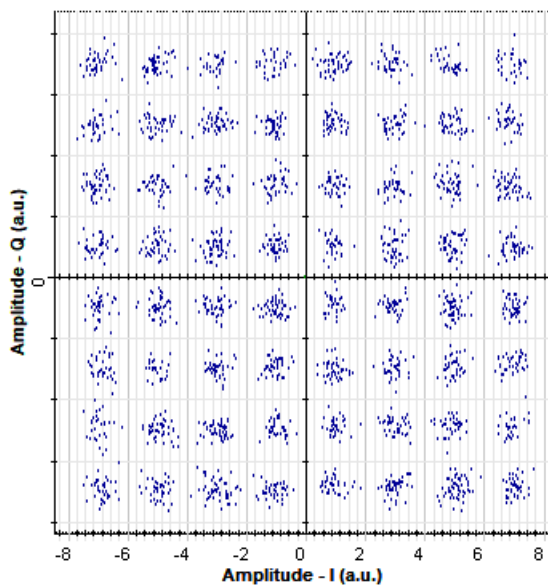
Optical Spectrum Analyzer



(b) Espectro óptico en enlace de descarga en ODN

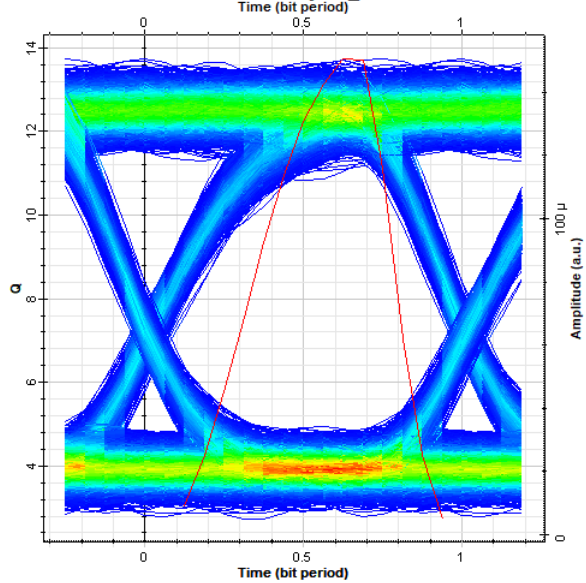
Figura 4.20: Señales eléctricas y ópticas transmitidas desde CO

Constellation Visualizer - Output



(a) Bits recibidos

BER Analyzer\_1



(b) Factor Q y diagrama de ojo de la tecnología GPON

Figura 4.21: Recuperación de bits y eficiencia de la red

En el enlace [UL](#) se analiza el diagrama de ojo en la red [GPON](#), dando un factor de calidad  $Q = 7,5$  dB. De igual manera se muestran las portadoras ópticas a longitudes de onda de 1310 nm y 1555 nm, respectivamente, estas gráficas se muestran en la figura [4.22](#).

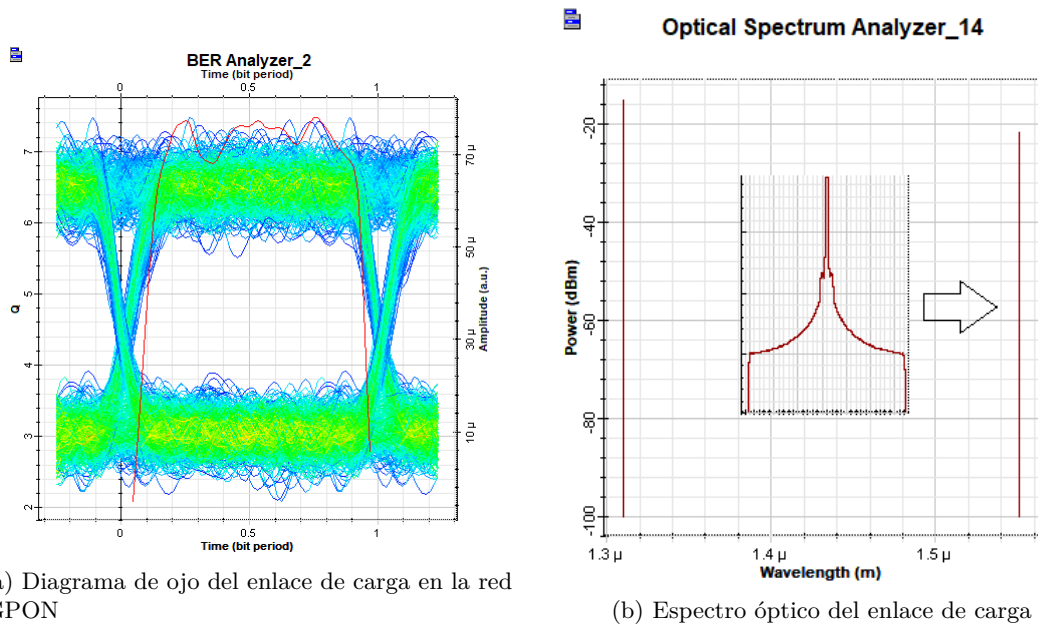


Figura 4.22: Señales enviadas en enlace de carga

## 4.2. Resultados de D-RoF en red GPON

Realizada la simulación se obtiene como resultado en el enlace DL se genera el diagrama de ojo presentado en la figura 4.23a con un factor de calidad  $Q = 14,1$  dB; para el enlace UL se obtiene un diagrama de ojo con un factor de calidad  $Q = 8,13$  dB el cual se muestra en la figura 4.23b. En ambos casos tanto la señal mostrada como el factor de calidad presenta una mejora a los casos antes presentados.

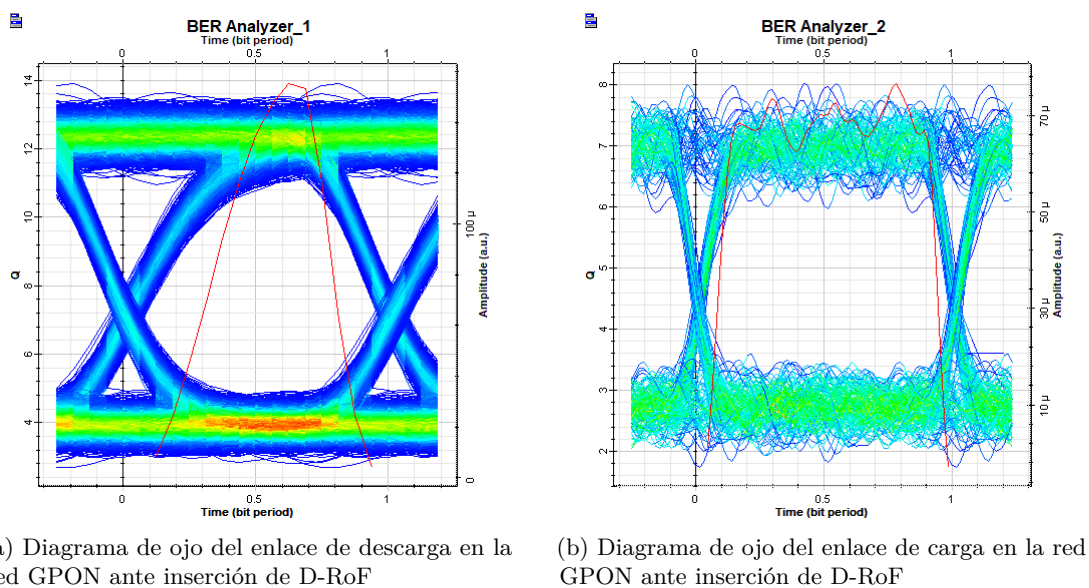
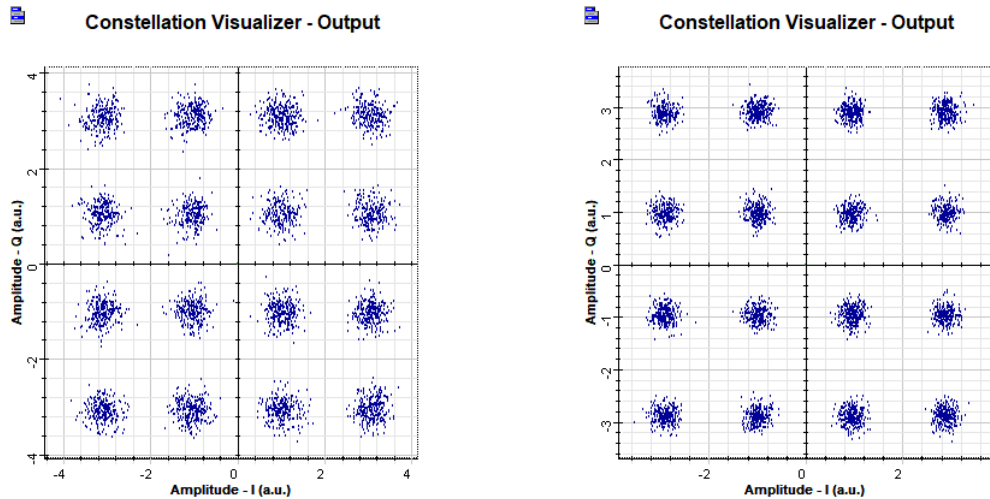


Figura 4.23: Respuesta de la red GPON ante D-RoF

Es importante mencionar que el sistema se ve seriamente afectado por el número de bits para la resolución del conversor. Es decir, con una resolución correcta, se puede reducir notablemente la magnitud del vector de error “*Error vector magnitude (EVM)*” del sistema; como se muestra en la figura 4.24 en donde el diagrama de constelación de la derecha con un mejor *EVM* presenta menor dispersión.



(a) Diagrama de constelación de 16-QAM en A-RoF

(b) Diagrama de constelación de 16-QAM en D-RoF

Figura 4.24: Comparación entre dispersión de los bits recibidos

### 4.3. Comparación de tecnología A-RoF & D-RoF

Una vez simulados los diferentes sistemas y recopilada la información necesaria, se procede a comparar los resultados para los 3 tipos de modulación y para cada técnica de A-RoF y D-RoF.

#### 4.3.1. Parámetro BER

Se realiza el análisis de los resultados obtenidos en el enlace desde CO hasta el usuario final. En la figura 4.25 se obtienen las curvas de BER para 4-QAM, 16-QAM y 64-QAM del sistema IFoF. Como se puede observar en la misma imagen, para ofrecer 64-QAM se necesitan potencia óptica en la entrada de la BS mayor a  $-7dBm$ . Si se fija un valor de BER, de  $10^{-6}$ , para 4-QAM, 16-QAM y 64-QAM se necesitaría de potencia receptora  $-15,8$ ,  $-12$ ,  $-6 dBm$ , respectivamente, lo que implica un mayor consumo energético. Sin embargo, dicho consumo energético sería más crítico en las BS, pudiendo aumentar el valor de los equipos utilizados.

Se obtiene el BER de la red al aplicarle RFoF en los 3 diferentes tipos de modulación. Se puede apreciar que se tienen tasas de error bajas a pesar de las pérdidas existentes en la ODN debido a fusiones, conectores y divisores de señal. Esto se divide en la figura 4.26 en donde se aprecia que a partir de una potencia del receptor de  $-10dBm$  el BER tiene valores bajos.

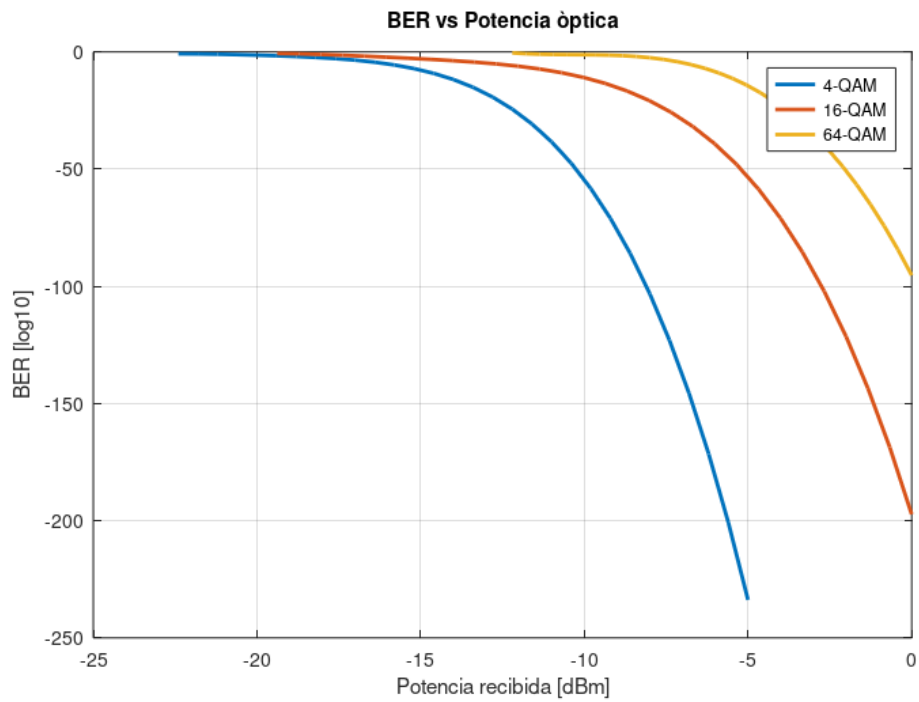


Figura 4.25: Error de bit en función de potencia óptica de señal IF recibida en BS para A-RoF

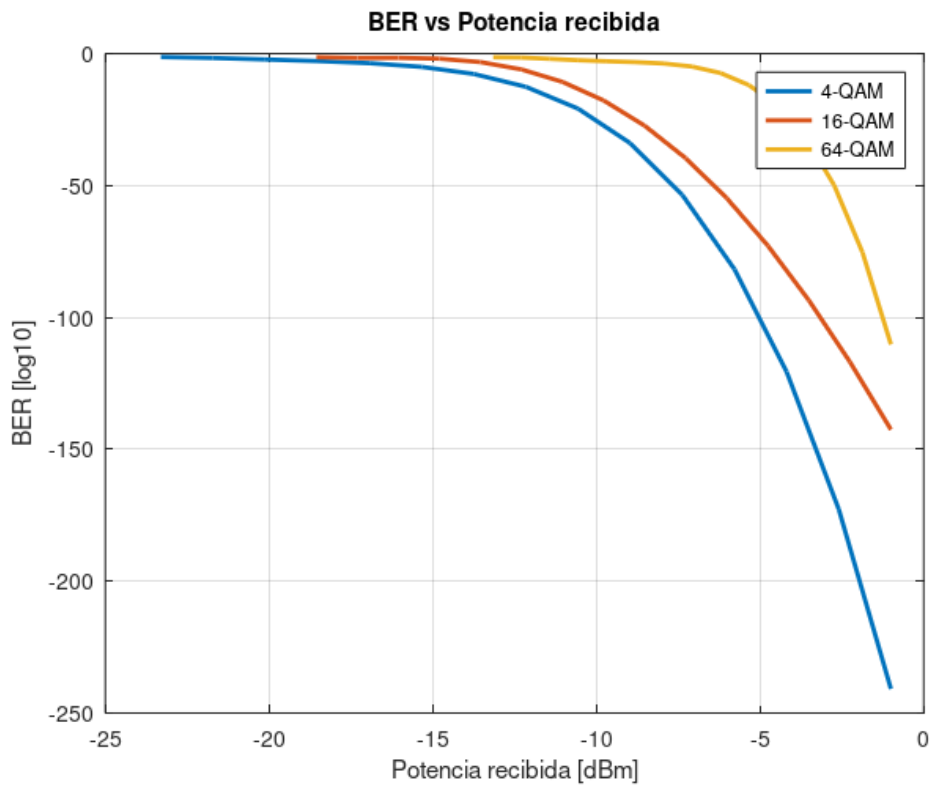


Figura 4.26: Error de bit en función de potencia óptica de señal RF recibida en BS para A-RoF

Se obtiene las curvas de BER para el caso de D-RoF. En la figura 4.27 se presenta para una frecuencia IF, mientras que en la figura 4.28 se presenta para RF. En ambos casos se observan curvas muy parecidas y los valores referentes son similares para las dos gráficas.

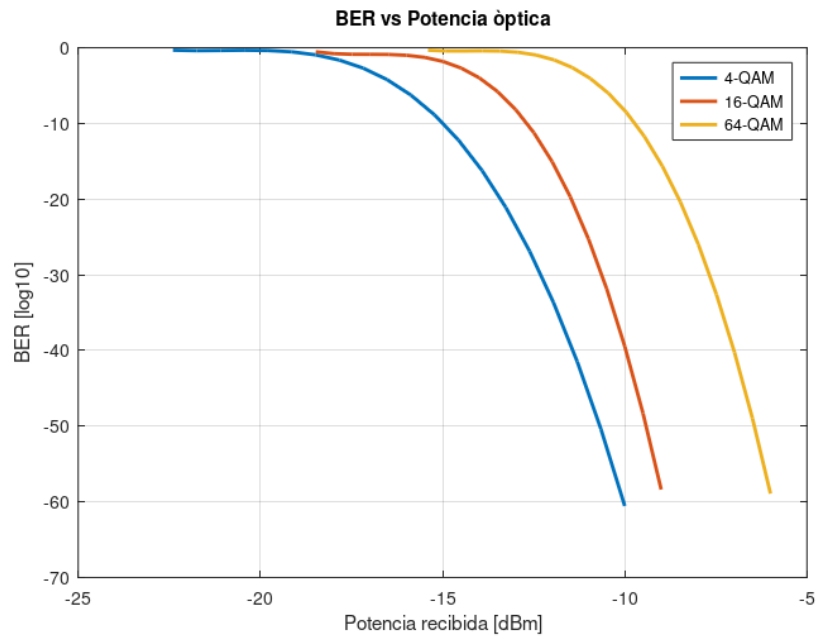


Figura 4.27: Error de bit en función de potencia óptica de señal IF recibida en BS para D-RoF

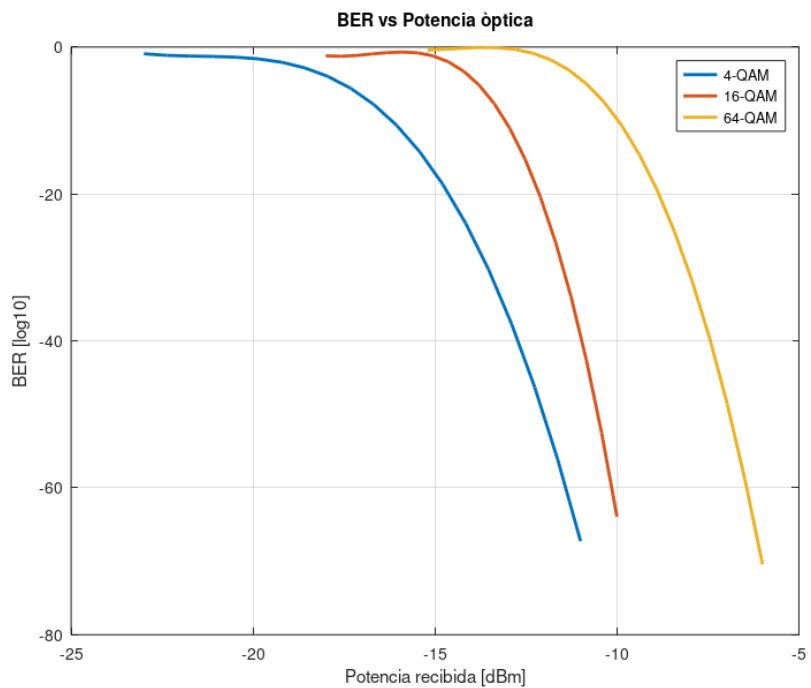


Figura 4.28: Error de bit en función de potencia óptica de señal RF recibida en BS para D-RoF

Una vez terminada las simulaciones de cada conjunto de modulaciones y frecuencia empleada, se elabora una comparación entre los BER obtenidos, dando como resultado lo mostrado en la figura 4.29. En dicha figura se aprecia que mediante D-RoF se logran mejores tasas de transmisión, disminuyendo la tasa de error y potencia recibida en BS.

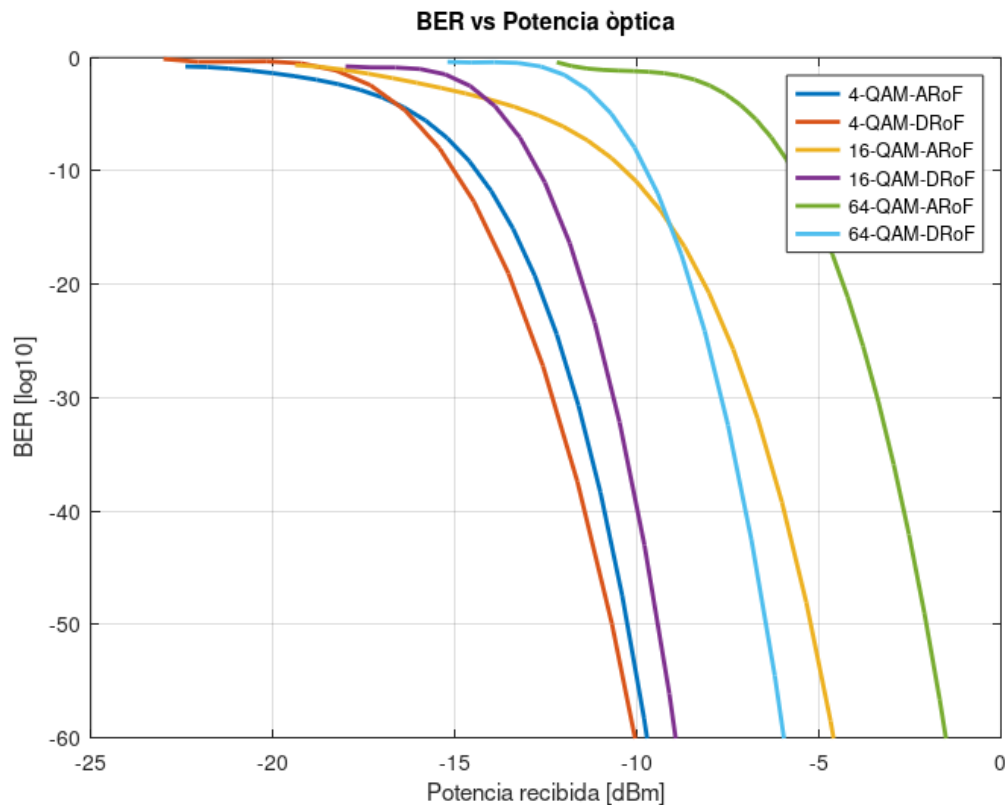


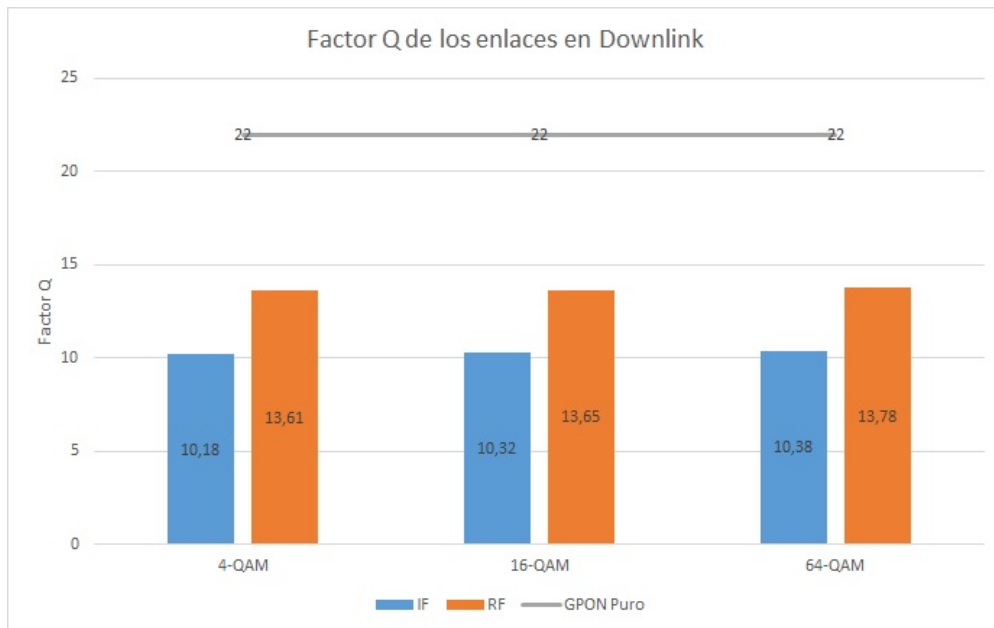
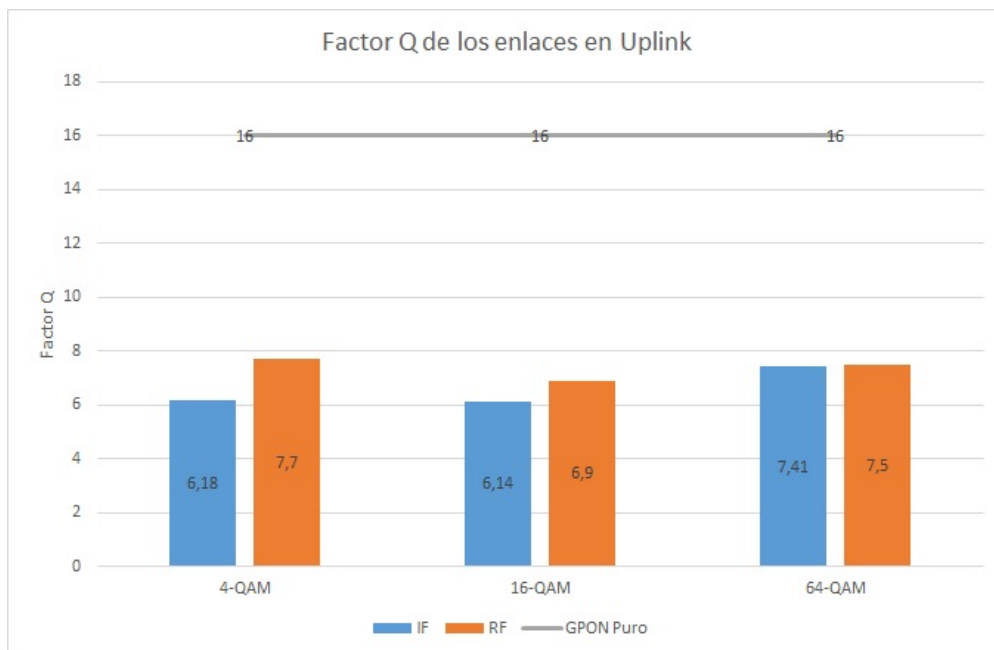
Figura 4.29: Comparación de BER entre A-RoF y D-RoF

### 4.3.2. Parámetro de calidad $Q$

Para evaluar si la inserción de RoF afecta a la tecnología GPON desplegada sobre la red, se procede a medir el factor  $Q$  antes y después de implementada la tecnología, tanto para el enlace de descarga como para el enlace de carga.

En la figura 4.30 se observa los resultados obtenidos para el enlace de descarga, en los cuales se aprecia que de un factor de calidad  $Q = 22$  para GPON se pasa a una media de  $Q = 13,68$  para RFoF y  $Q = 10,29$  para IFoF, lo que deja ver una reducción de la eficiencia de la red GPON.

De igual manera se comprueba la afección existente en el enlace UL, obteniendo como resultado lo mostrado en la figura 4.31. En esta imagen se puede apreciar que el factor de calidad de una red GPON es de  $Q = 16$  mientras que en promedio de para RFoF es  $Q = 7,37$  y para IFoF se reduce a  $Q = 6,58$ .

Figura 4.30: Factor de calidad  $Q$  del enlace de descargaFigura 4.31: Factor de calidad  $Q$  del enlace de carga

Para el caso de **D-RoF** se tiene en promedio un factor de calidad  $Q = 14,1$  mientras que para **A-RoF** su promedio es de  $Q = 13,68$  en **DL**. De esta misma manera como se aprecia en la figura 4.32 para **UL** el promedio del factor de calidad de **D-RoF** es  $Q = 8,13$  mientras que en el caso de **A-RoF** el promedio es menor con un valor de  $Q = 7,37$ ; claramente se observa una mejoría considerable al utilizar **D-RoF** en ambos casos permitiendo con esto tener una mejor eficiencia de la red.



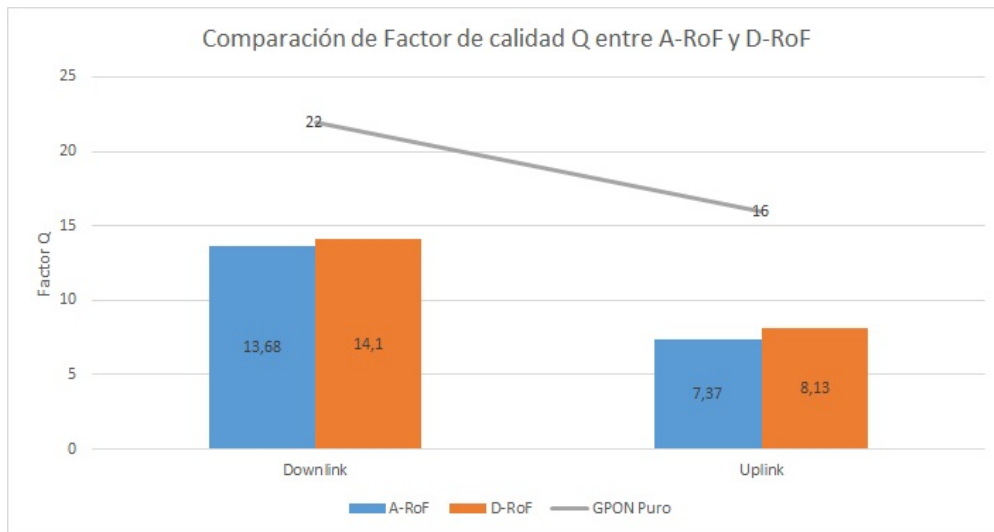


Figura 4.32: Comparación del factor de calidad obtenido en enlace de descarga y carga para A-RoF y D-RoF

#### 4.3.3. Potencia RF de la señal recibida en BS

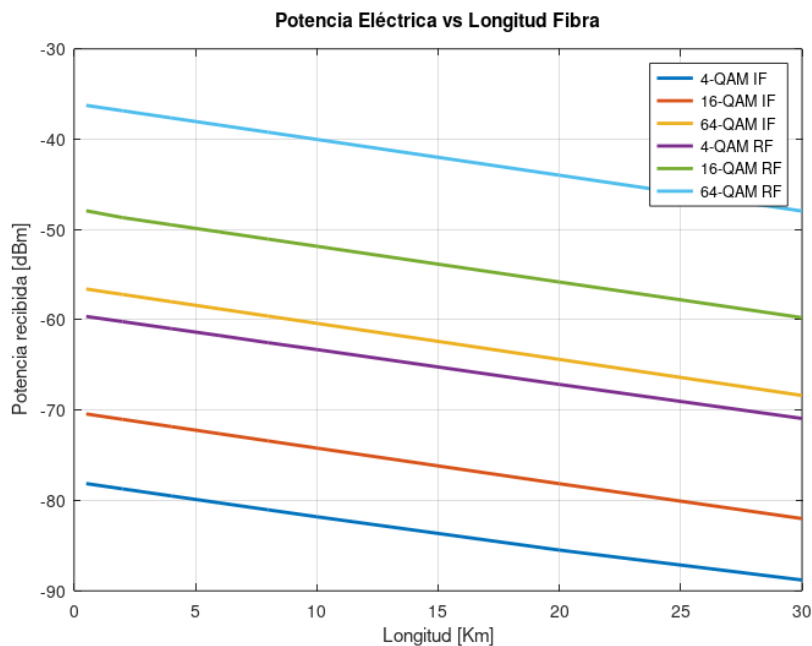


Figura 4.33: Potencia RF de la señal en BS con A-RoF

En la figura 4.33 se observa la potencia recibida de la señal en el espectro eléctrico posterior a la conversión óptico-eléctrica y previo a la etapa de amplificación para radiarla, tanto para IFoF como para RFoF. Se obtiene como resultado que con IFoF se tiene una mayor pérdida de potencia en la ODN que con RFoF.

En el caso de D-RoF las curvas de potencia eléctrica se observan en la figura 4.34. Se puede apreciar

Tabla 4.1: Comparativa de resultados obtenidos

Parámetro	Resultados
BER	- D-RoF ofrece tasas más bajas de pérdidas de bits a comparación de A-RoF. - Dentro de A-RoF, el uso de frecuencias altas (microondas) afecta menos a la red que usando frecuencias bajas (frecuencia intermedia).
Factor Q	- La eficiencia de la red disminuye menos empleando D-RoF. - De igual manera, el uso de señales microondas en A-RoF, permite poseer una mejor eficiencia de la red a comparación que con frecuencias intermedias.
Potencia óptica recibida	- Existe menos pérdidas de potencia óptica usando D-RoF. - El uso de frecuencias altas en A-RoF, afecta menos a la eficiencia de la red.

que debido a la disminución de la tasa de error, la potencia del láser tiende a ser más baja.

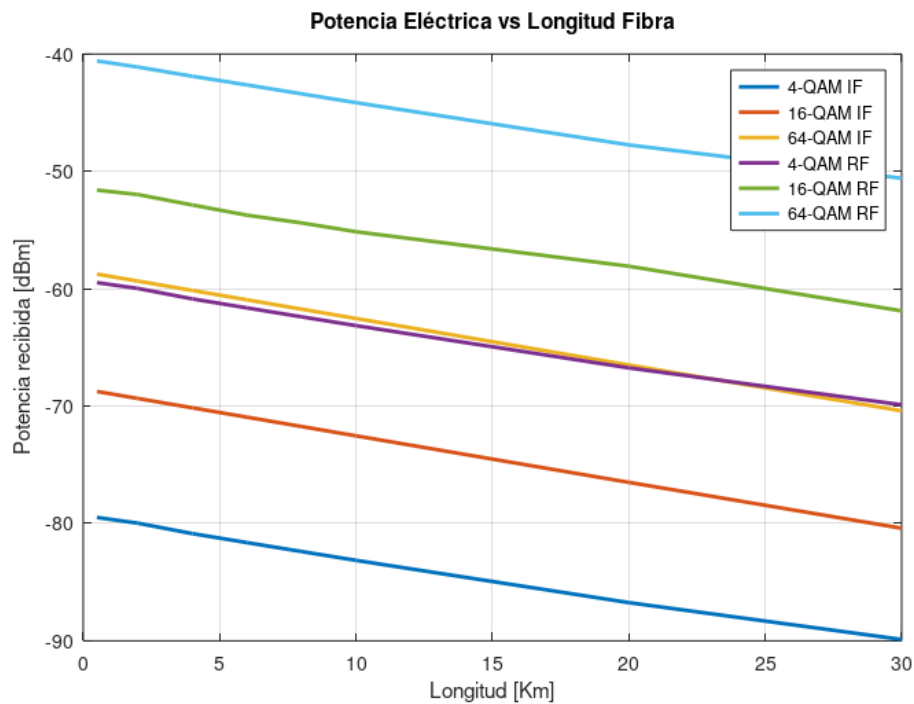


Figura 4.34: Potencia RF de la señal en BS con D-RoF

Tabla 4.2: Resultados obtenidos para el factor Q [dB].

		A-RoF		D-RoF	
		DL	UL	DL	UL
n-QAM	RF	13.68	7.37	14.1	8.13
	IF	10.3	6.58	13.7	7.9



#### 4.4. Resumen

En las tablas 4.2 y 4.1 se pueden observar los resultados obtenidos al monitorear la eficiencia de la red mediante el factor de calidad Q, BER y potencia óptica recibida en la BS. Se obtuvo que el factor Q no depende del tipo de modulación empleado, sino más bien de la frecuencia de la señal eléctrica transmitida, ya que señales de frecuencia intermedia deterioran más la calidad del enlace.

Es decir, IFoF disminuye el rendimiento de la red, a comparación de RFoF, tanto para A-RoF como para D-RoF. Esto va estrechamente enlazado al aumento de la potencia de recepción en BS, siendo RFoF la que menor energía pierde en la ODN. Sin embargo, en el caso del parámetro BER, la diferencia entre IFoF y RFoF es mínima. Por otro lado, existe una mejora notable en este parámetro, cuando se comparan A-RoF y D-RoF, ya que se mejora el rendimiento de la red mediante el empleo de D-RoF.

CAPÍTULO  
**5**

---

## Simulación en redes empresariales

Después de haber explicado los aspectos teóricos más relevantes sobre **RoF** y sobre los parámetros de monitoreo, en este capítulo se realizó un análisis del comportamiento de una red **GPON** al insertar y enviar datos mediante **RoF**.

Los parámetros considerados para el monitoreo del comportamiento de la red son el Factor Q o factor de calidad y la **BER** con los cuales se puede medir los efectos causados por la dispersión cromática y la atenuación, quienes permiten tener una vista sobre la degradación de la señal en el receptor y de la influencia de **RoF** en la red. Las simulaciones son realizadas en el software OptiSystem y los valores característicos de la red como: potencia de transmisión, nivel de división de la señal, longitud de la fibra óptica son tomados de redes empresariales desplegadas en la ciudad de Cuenca, de esta forma se obtienen resultados más apegados a la realidad dando una visión del comportamiento que se tendría en dichas redes operativas. Un resumen de la variación de parámetros en cada caso de red empresarial se presenta en la tabla 5.1. Así mismo, se presenta la curva del coeficiente de atenuación en función de la longitud de onda, conforme las características técnicas de la fibra G652.D (figura 5.1).

Tabla 5.1: Redes empresariales analizadas

Red empresarial	Caso	Longitud ODN	Splitter 1er nivel	Splitter 2do nivel
1	1	1.337 Km	1:8	1:4
	2	0.536 Km	1:8	1:4
2	1	5.591 Km	1:8	1:8
	2	0.921 Km	1:4	1:8
	3	12.184 Km		

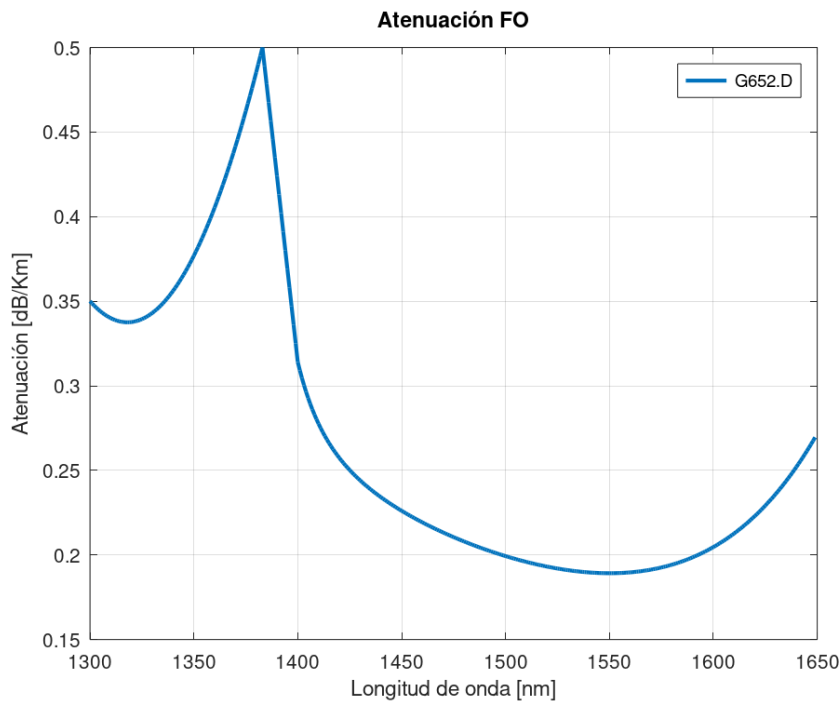


Figura 5.1: Coeficiente de atenuación en función de la longitud de onda para la fibra G652.D

## 5.1. Red empresarial 1

### 5.1.1. Caso 1

En este caso se tiene una red desplegada con 2 niveles de división (*splitter*) el primer nivel es una división de 1 a 8 mientras que el segundo nivel se encuentra una división de 1 a 4, en cada segmento de la red después de cada división se tienen pérdidas de  $9,63dB/Km$  y  $6,32dB/Km$  respectivamente, la longitud total del enlace es de 1337 metros, estos datos se presentan en la tabla 5.2. Con las características dadas se realiza la simulación enviando los datos de RoF en la ventana de 1550 nm y a una tasa de  $5Gbps$ , mientras que la señal de GPON es enviada a una tasa de  $2,5Gbps$  en la ventana de 1490 nm para el caso del enlace de bajada (desde la oficina central al usuario) *downlink* y en el caso del enlace de subida o *uplink* (desde el usuario a la oficina central) se utiliza la ventana de 1310nm y se transmite a una velocidad de  $1,25Gbps$ .

Al realizar simulaciones aumentando la potencia en el transmisor se logra obtener la curva de BER la cual se muestra en la figura 5.2, aquí se observa un descenso del BER la cual a partir de de una potencia de recepción de  $-8dBm$  se logra disminuir a valores por debajo de  $10^{-3}$  en el receptor asegurando de esta forma una recuperación óptima de la señal.

El primer caso planteado se tiene una red con las características mostradas en la tabla 5.2 y una modulación de la señal RoF de 64-QAM. La red como se observa en la figura 5.2 tiene un comportamiento óptimo ya que al mejorar la potencia recibida el BER disminuye, teniendo como referencia una potencia de recepción de  $-10dBm$  se tendría un BER de  $10^{-2}$ . Este valor de BER representa una cantidad considerable de pérdidas pero al tener una potencia de recepción de  $-4dBm$  el valor del BER cae a un  $10^{-17}$  lo cual asegura una buena recepción.

Tabla 5.2: Parámetros para la red del caso 1

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Longitud 1er nivel	750 m	Longitud 2do nivel	587 m
Splitter	1:8	Splitter	1:4
Pérdidas	9.63 dB/Km	Pérdidas	6.32 dB/Km

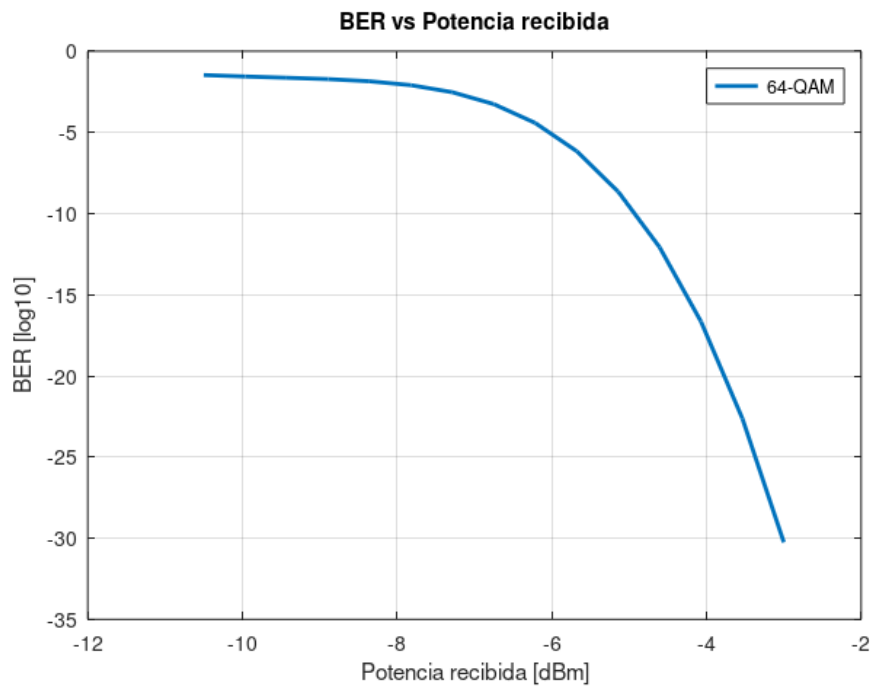
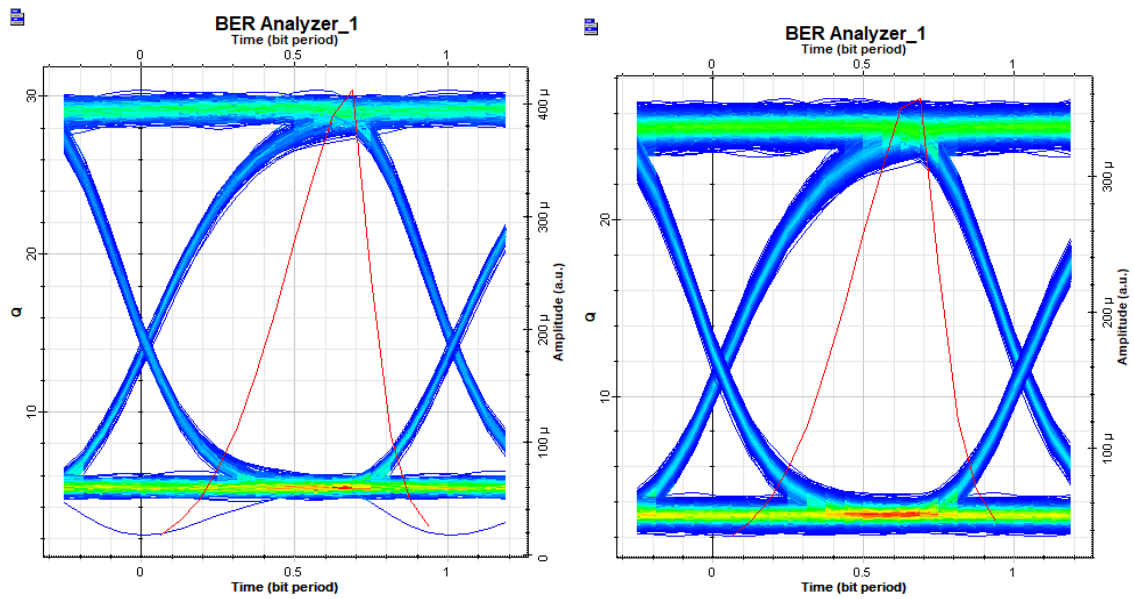


Figura 5.2: Tasa de error de bit versus la potencia de la señal recibida para el caso 1

En la figura 5.3a se muestra el diagrama de ojo del enlace de bajada “*Downlink (DL)*” de una red GPON en donde se tiene un factor Q de 30,85 dB y se aprecia un bajo ruido en la señal receptada. Al enviar en la red una señal RoF se aprecia un pequeño aumento de ruido de la señal recibida como se ve en la figura 5.3b a comparación de la señal obtenida en una red GPON pura, el factor Q en este enlace GPON-RoF es de 26,06 dB, un valor menor al anterior pero que permite la recuperación total de la señal en el receptor de la red.

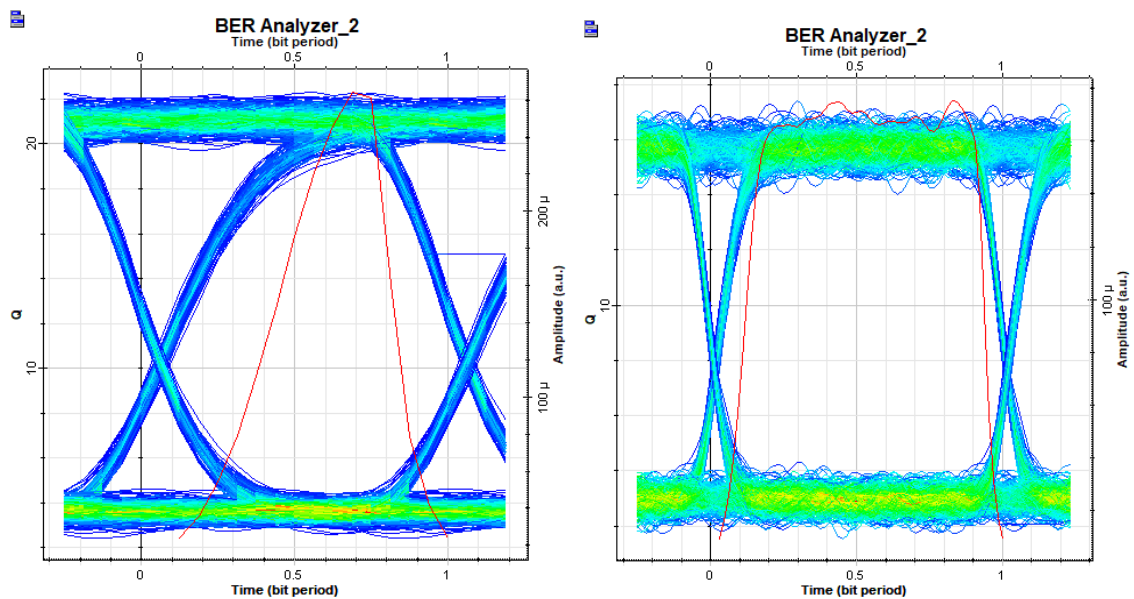
Analizando el caso del enlace de carga “*UL*” se obtiene un diagrama de ojo para la red GPON la cual se presenta en la figura 5.4a donde se tiene un factor Q de 22,08 dB y la señal presenta poco ruido. Al tener una red GPON-RoF como se muestra en la figura 5.4b el ruido de la señal receptada aumenta considerablemente a comparación de la señal en una red puramente GPON, sin embargo, el factor Q de 17,45 dB indica que la calidad del enlace es bueno y que la señal puede ser recuperada.



(a) Factor de calidad y diagrama de ojo para la red FTTH

(b) Factor de calidad y diagrama de ojo para la red FTTH-RoF

Figura 5.3: Resultados obtenidos de la red empresarial 1 caso 1 en enlace de descarga



(a) Factor de calidad y diagrama de ojo para la red FTTH

(b) Factor de calidad y diagrama de ojo para la red FTTH-RoF

Figura 5.4: Resultados obtenidos de la red empresarial 1 caso 1 en enlace de carga

### 5.1.2. Caso 2

El segundo caso presentado se establece una red que consta de dos niveles de división de señal la primera una división de 1 a 8 y la segunda con una división de 1 a 4 como se muestra en la tabla 5.3. Las pérdidas son similares al caso 1 antes presentado pero la longitud del enlace es menor con una

Tabla 5.3: Parámetros para la red del caso 2

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Longitud 1er nivel	250 m	Longitud 2do nivel	136 m
Splitter	1:8	Splitter	1:4
Pérdidas	9.63 dB/Km	Pérdidas	6.32 dB/Km

distancia de 536 metros en total. La modulación realizada es de 64-QAM y la ventana usada para la señal RoF al igual que en el caso anterior es la de 1550 nm.

Al realizar el envío y recepción de la señal se gráfica la curva del BER la cual se observa en la figura 5.5 en donde se tiene un descenso deseado de menos de  $10^{-3}$  de la tasa de error a partir de una potencia de recepción de  $-7\text{dBm}$  con estos valores se tiene un margen óptimo para poder recuperar completamente la señal en el receptor.

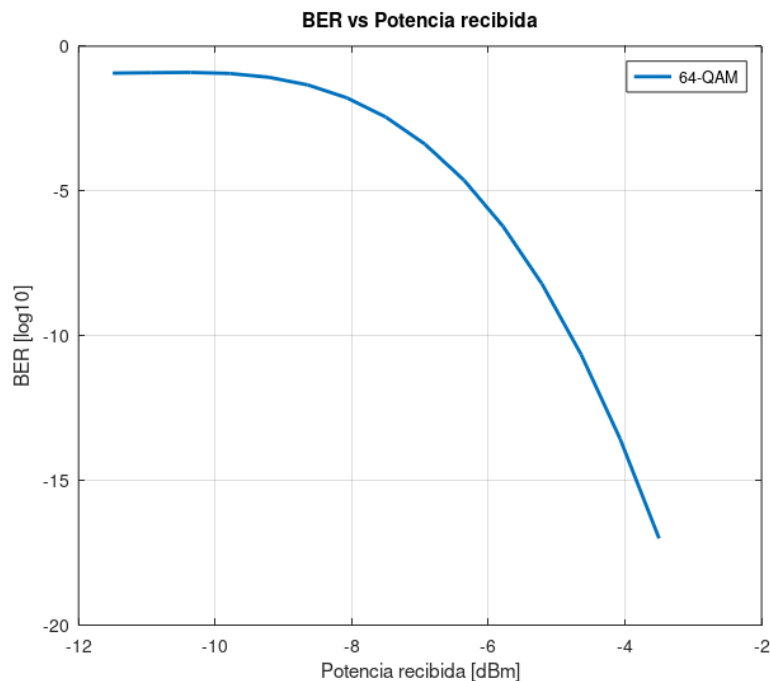
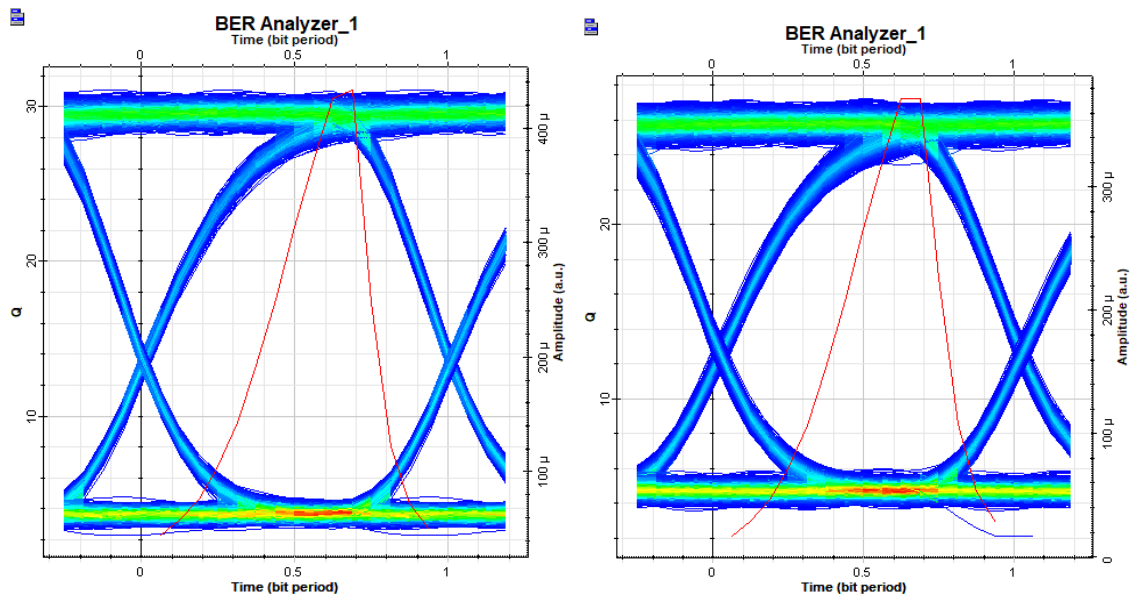


Figura 5.5: Tasa de error de bit versus la potencia de la señal recibida para el caso de la red empresarial 1 caso 2

Se analiza el diagrama de ojo obtenido para DL en donde tanto para la red puramente GPON mostrada en la figura 5.6a como para el caso de la red GPON-RoF que se muestra en la figura 5.6b se aprecia un ruido bajo en la señal receptada esto se debe en gran parte a la distancia corta del enlace. Sin embargo, el factor de calidad Q de 31,16 dB obtenido en la red GPON es mayor que en el caso de la red con la inserción de RoF donde el factor de calidad Q disminuye a 27,83 dB se mantiene en un rango deseado.

En el enlace de UL se aprecia que para el caso de la red GPON mostrada en la figura 5.7a el ruido de la señal es mínimo y su factor  $Q = 19,61$  dB es alto en comparación con la señal de la red GPON-RoF. Como se muestra en la figura 5.7b, está señal presenta un aumento en el ruido el cual afecta a su factor de calidad Q que desciende a 17,92 dB.

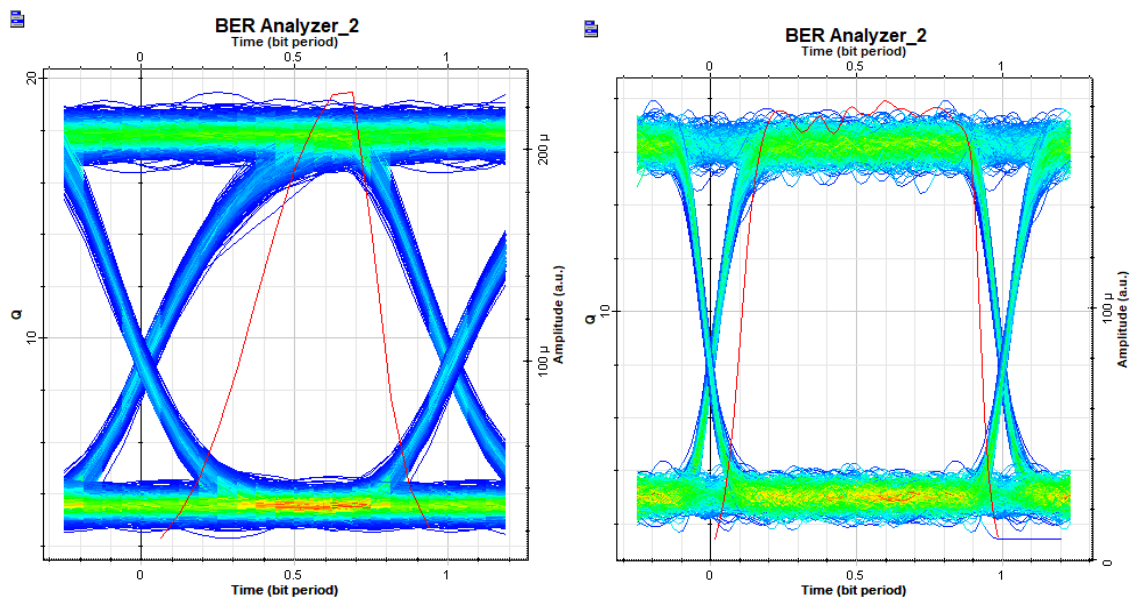




(a) Factor de calidad y diagrama de ojo para la red FTTH

(b) Factor de calidad y diagrama de ojo para la red FTTH-RoF

Figura 5.6: Resultados obtenidos de la red empresarial 1 caso 2 en enlace de descarga



(a) Factor de calidad y diagrama de ojo para la red FTTH

(b) Factor de calidad y diagrama de ojo para la red FTTH-RoF

Figura 5.7: Resultados obtenidos de la red empresarial 1 caso 2 en enlace de carga

Tabla 5.4: Parámetros para el primer caso de la red empresarial 2

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Longitud 1er nivel	2.055 Km	Longitud 2do nivel	3.541 Km
Splitter	1:8	Splitter	1:8
Pérdidas	9.63 dB/Km	Pérdidas	9.56 dB/Km

## 5.2. Red empresarial 2

### 5.2.1. Caso 1

En este primer caso de la red empresarial 2 se tiene un enlace con una longitud cercana a los 6 kilómetros, presenta dos niveles de división de la señal el primero de 1 a 8 y el segundo de 1 a 8 como se ve en la figura 5.4, la tasa de envío de datos al igual que las ventanas utilizadas tanto para los enlaces de bajada y los enlaces de subida se mantienen como en los casos de la red empresarial anterior.

La gráfica de BER de la figura 5.8 muestra un descenso considerable de la tasa de error a partir de una potencia de llegada de  $-8$  dBm con la cual se llega a un nivel de BER de  $10^{-4}$  dentro del rango para la recepción correcta de la señal.

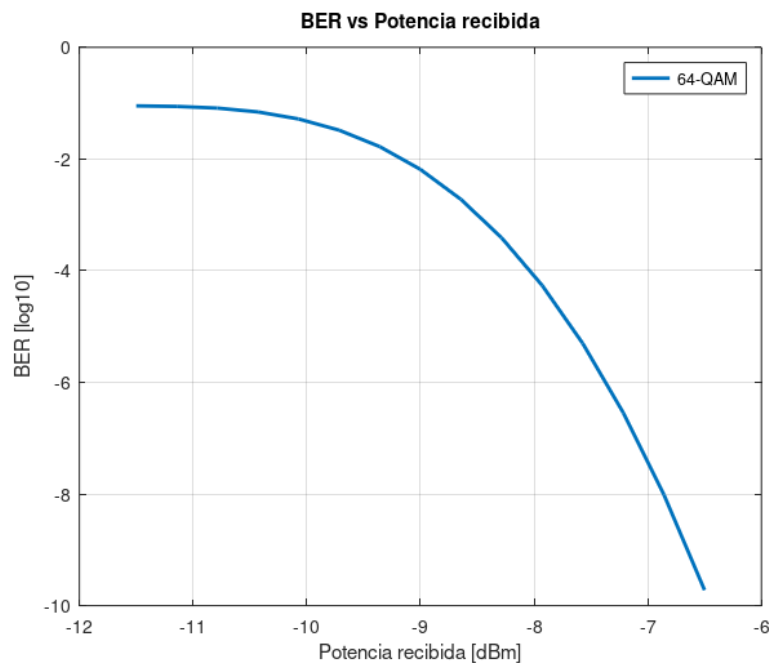


Figura 5.8: Tasa de error de bit versus la potencia de la señal recibida para el caso 1 de la red empresarial 2

Para el enlace DL el diagrama de ojo de la red GPON es mostrada en la figura 5.9a y la red con RoF se presenta en la figura 5.9b, se aprecia un comportamiento parecido en ambos casos en donde los valores del factor de calidad de 16,52 dB y 14,11 dB de cada red respectivamente muestran un comportamiento similar.

Para el enlace UL de la red GPON el factor de calidad baja a  $Q = 10,79$  dB como se ve en la figura 5.10a. En la red GPON-RoF se muestra un factor de calidad de  $Q = 7,58$  dB y una mayor presencia

de ruido. Estos valores del factor de calidad en comparación a los casos de la red empresarial 1 son menores debido a las características de la red, su mayor distancia y sus niveles de división de señal.

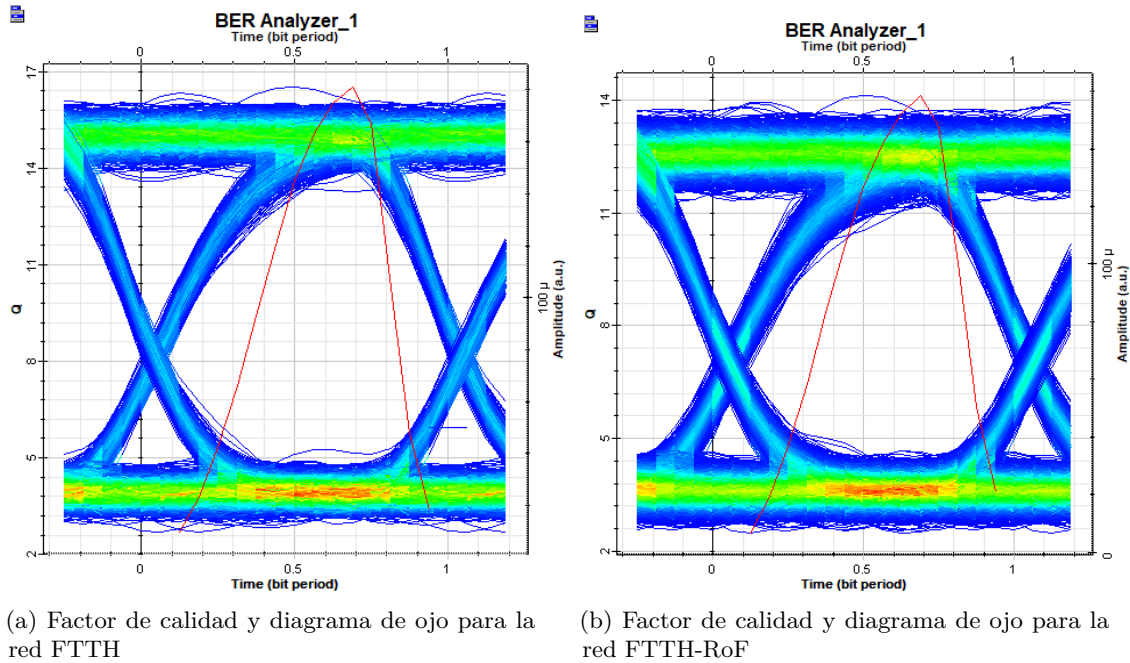


Figura 5.9: Resultados obtenidos de la red empresarial 2 caso 1 para enlace de descarga

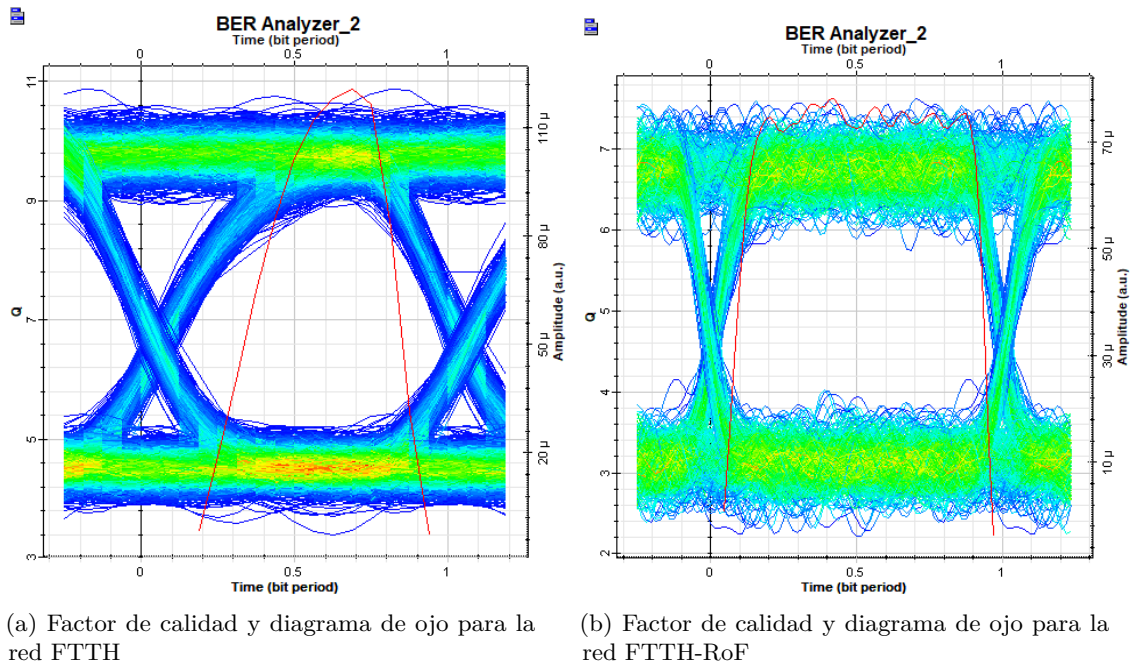


Figura 5.10: Resultados obtenidos de la red empresarial 2 caso 1 para enlace de carga

Tabla 5.5: Parámetros para del caso 2 de la red empresarial 2

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Longitud 1er nivel	90 m	Longitud 2do nivel	831 m
Splitter	1:4	Splitter	1:8
Pérdidas	6.41 dB/Km	Pérdidas	9.56 dB/Km

### 5.2.2. Caso 2

En este caso las condiciones de la red se modifican como se observa en la tabla 5.5 en donde la distancia del enlace disminuye y los dos niveles de división de la señal pasan de 1 a 4 y de 1 a 8, con esto las pérdidas en el enlace disminuyen considerablemente. Esto se nota en el BER mostrado en la figura 5.11 pero también en las gráficas de diagrama de ojo de los enlaces DL, en donde, como se observa en la figura 5.12a para la red puramente GPON la señal llega con poco ruido y un factor de calidad de  $Q = 30,18$  dB, valor que se mantiene cercano en el caso de la red GPON-RoF con un factor  $Q = 27,06$  dB como se ve en la figura 5.12b.

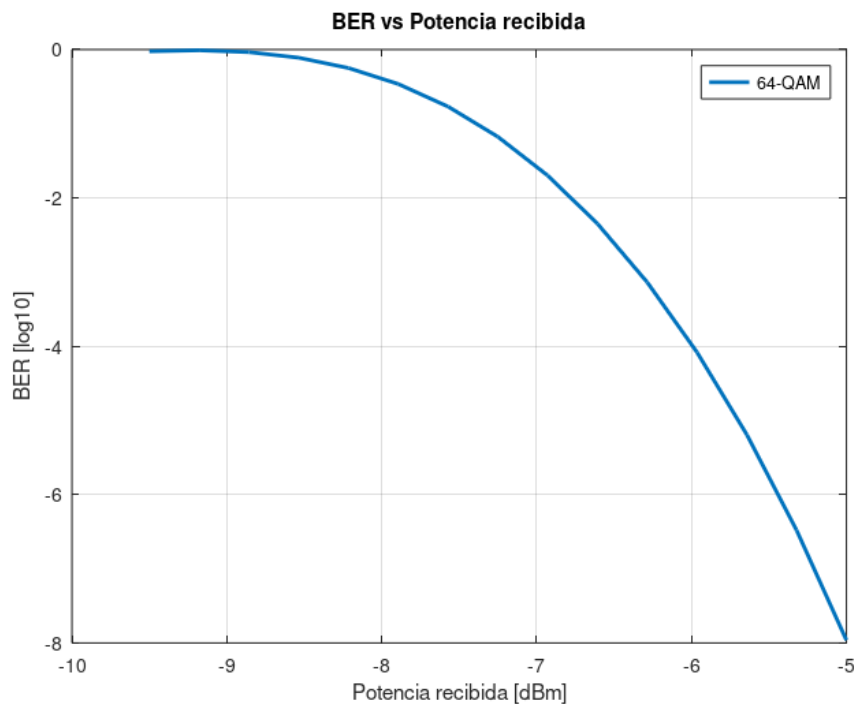


Figura 5.11: Tasa de error de bit versus la potencia de la señal recibida para el caso 2 de la red empresarial 2

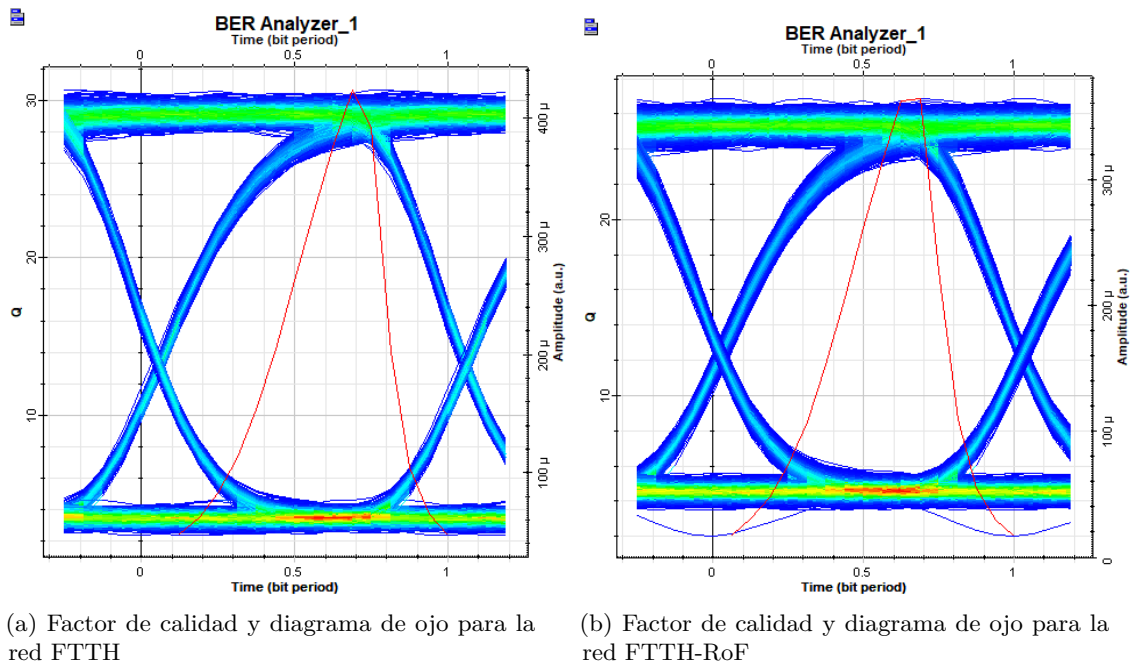


Figura 5.12: Resultados obtenidos de la red empresarial 2 caso 2 para el enlace de descarga

Para el enlace de carga se presenta una caída de la calidad del enlace entre la red puramente GPON cuyo diagrama de ojo está sin mucho ruido como se ve en la figura 5.13a y su factor de calidad  $Q = 23,27$  dB en comparación con la red donde se inserta RoF la cual posee un factor  $Q$  17,87 dB y su diagrama de ojo mostrado en la figura 5.13b presenta un ruido mayor que dificulta la recuperación de la señal, a pesar de ello esta en un rango aceptable para poder recuperar la información enviada.

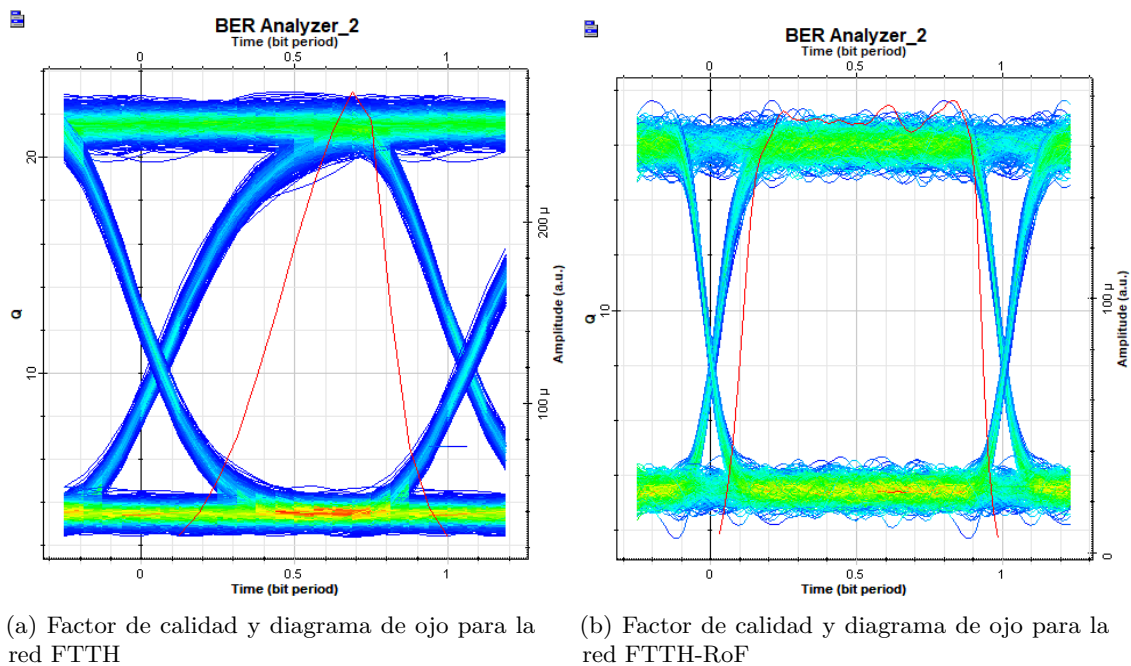


Figura 5.13: Resultados obtenidos de la red empresarial 2 caso 2 para enlace de carga

### 5.2.3. Caso 3

En el caso 3 se tiene una red de transmisión directa, es decir en la red no se tiene divisores (*splitter*) por lo que la conexión entre transmisor y receptor se da directo por el tendido de fibra óptica. Se presenta un escenario en donde la distancia de enlace es de  $12,184\text{km}$  como se observa en la red simulada que aparece en el apéndice A.5. Para este caso se tiene **RoF** puro sobre la red.

Al comparar el BER con la potencia del receptor como en casos anteriores se puede observar los efectos de grandes distancias, con una potencia en el receptor de  $-4\text{ dBm}$  se logra obtener un BER de  $10^{-4}$  el mismo que disminuye más conforme aumenta la potencia en el receptor como se ve en la figura 5.14.

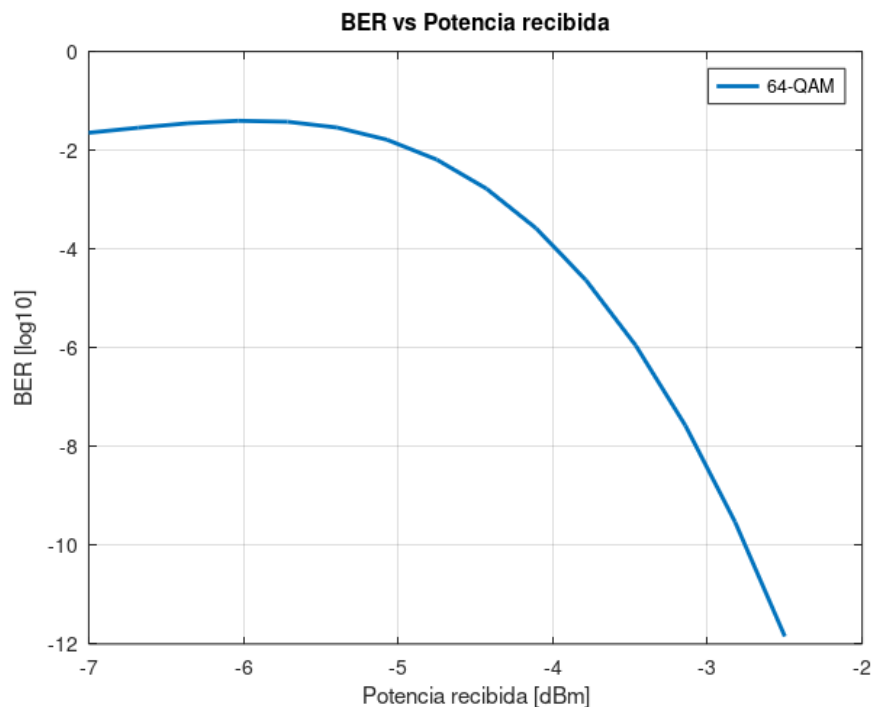


Figura 5.14: Tasa de error de bit versus la potencia de la señal recibida para el caso 3 de la red empresarial 2

## 5.3. Conclusiones

Se pudo observar, para los cinco casos simulados en este capítulo, que el factor de calidad en todos disminuía cuando a la red puramente **GPON** se le agregaba **RoF**. Esto debido a que el comportamiento de las señales **RF** enviadas son tomadas en cuenta al momento de realizar el diagrama de ojo y el cálculo del factor  $Q$ .

En cada enlace simulado se obtuvo valores de  $Q$  óptimos lo que permite considerar viable la inserción de la nueva tecnología **RoF** en los distintos escenarios brindados por las empresas en la ciudad. En los casos donde la distancia de enlace era menor a 800 metros se apreció valores altos de factor de calidad de la red **GPON-RoF** con los de la red puramente **GPON**. De igual forma los valores de **BER** obtenidos nos dejan ver una tendencia clara a disminuir según aumenta la potencia que le llega al receptor. Para



el caso de la red empresarial 2, caso 3, al tener puramente **RoF**, se obtiene mayor alcance empleando menor potencia de transmisión.

Es importante aclarar que los valores obtenidos, tanto de factor de calidad **Q**, **BER** y diagrama de ojo, no son similares con los obtenidos en el capítulo 4. Esto se debe a que inicialmente las longitudes de las redes de distribución ópticas son mayores para el caso teórico. De igual manera, para el caso de las redes empresariales las pérdidas existentes dentro de la **ODN** varían, dependiendo del *splitter* empleado. Esto se puede corroborar tomando el caso 1 de la red empresarial 2, la cual es similar a las redes simuladas en el capítulo 4 y en ésta se puede apreciar que los resultados de factor **Q** son similares a los obtenidos en el planteamiento teórico, corroborándose que el factor **Q** disminuye cuantas más pérdidas existan en la red.

CAPÍTULO  
**6**

---

## Conclusiones y Recomendaciones

### 6.1. Conclusiones

Se comprueba la correcta implementación de escenarios de simulación mediante la comparación de los resultados obtenidos con investigaciones realizadas por otros autores. Se verificó una disminución de calidad de la tecnología GPON ante la inserción de RoF. Sin embargo, esta se encuentra dentro de los rangos aceptables de buen desempeño, siendo este valor inferior a  $1 \times 10^{-3}$  para el caso del BER y superior a 3 dB para el caso del factor Q.

Se verificaron distintos esquemas de modulación que proponen otros autores e incluso se analizó si señales puramente analógicas sin ningún tipo de modulación pueden ser transmitidas, logrando receptorlas. Pero a diferencia de las modulaciones digitales, en las modulaciones analógicas es necesario una adaptación más crítica del receptor para lidiar con desfases en la señal. Si bien, en las modulaciones digitales también existen desfases, en el mismo componente de receptor esta variable se puede ajustar.

Se simularon redes empresariales existentes en el entorno, gracias al apoyo de las empresas que brindaron información de las mismas. A diferencia de la teoría, para las redes empresariales se modelaron las pérdidas existentes en una fibra G652.D, se ajustaron las pérdidas de fusiones y conectores a los indicados por cada empresa, obteniendo buenos resultados. Es importante mencionar que para el caso de SCM se puede aplicar sobre una misma longitud de onda ( $\lambda$ ) cuando ambos elementos radiadores se encuentren en una BS. La distancia para cada nivel de *splitter* se recomienda sea menor a 3 Km y la distancia de la fibra que alimenta la BS con el último nivel de *splitter* sea menor a 2 Km, para aumentar la potencia óptica recibida en BS. Esto se logró realizando un barrido de la longitud del enlace de fibra que conecta a la BS, teniendo en cuenta los valores referenciales explicados en 2.

En cuanto al cambio de equipos, una de los beneficios que ofrece RoF es que su operación es independiente a los equipos presentes en la red. Solo debe agregarse un equipo que multiplexe ambos servicios, en diferentes longitudes de onda ( $\lambda$ ), sobre una fibra. Pueden ofrecerse varios servicios en RoF, como puede ser Digital Television (DTV), Quad-play, pero para estos casos se deben realizar modificaciones en el lado receptor para diferenciar servicios en el terminal.

Se comprueba que D-RoF ofrece mejores resultados en cuanto a transmisión en altas tasas de datos,





debido a la disminución de [ISI](#). Sin embargo, su aplicación resulta un poco costosa en la actualidad, debido al alto precio de los equipos electrónicos para el procesamiento de la señal.

## 6.2. Recomendaciones

Al tratarse de un primer acercamiento, tanto para la tecnología, como para el software, hay ciertos puntos que no fueron tomados en cuenta para el desarrollo de este trabajo, siendo:

- Cada componente tiene un parámetro [Reference wavelength](#), el cual puede alterar las mediciones tomadas, por el cual se recomienda colocar los valores cercanos a la longitud de onda de operación.
- Se recomienda para cada esquema de simulación, modificar a medida el controlador de ganancia del demodulador de cuadratura para el caso de [A-RoF](#).

## 6.3. Trabajos futuros

En esta sección se presentan posibles mejoras que pueden hacerse al presente trabajo con el fin de conocer más sobre la tecnología en futuras investigaciones:

- Un parámetro igualmente importante para determinar la eficiencia de la red, es [Error vector magnitude \(EVM\)](#), el cual es considerado al momento de implementar tecnología celular, por lo cual debería ser tomado en cuenta a futuro.
- En este trabajo se realizó análisis de las tasas de error, variando distancia y potencias. Sin embargo, si bien se tienen tasas de error inferiores a  $1 \times 10^{-3}$ , esto se encuentra co-rrelacionado con la energía empleada para transmitir, por lo cual es necesario realizar un estudio del consumo energético.
- Al tratarse de sistemas [WDM](#) es necesario considerar los efectos no lineales dentro de la fibra óptica, por lo cual se propone emplear el simulador para comparar con los resultados obtenidos en este trabajo.
- Implementar un sistema experimental para comprobar los resultados prácticos con los reales.

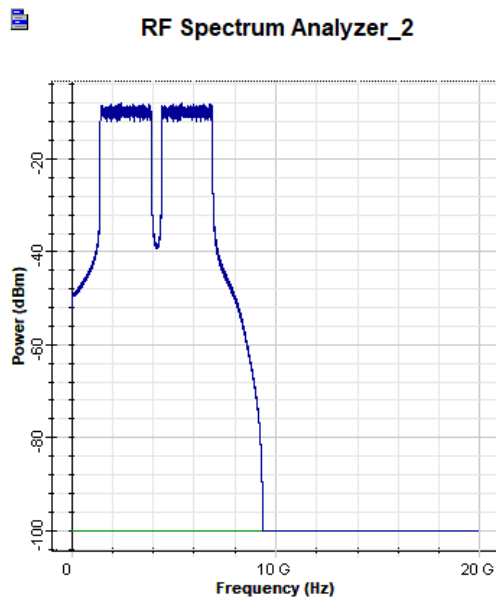


## Apéndice 1

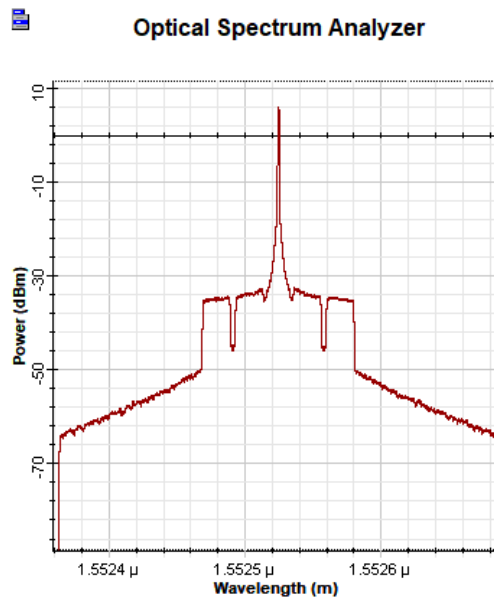
### A.1. Red GPON-RoF con SCM

Como se mencionó en la sección 3.3.3, para evitar redundancia en los resultados obtenidos, se procede a mostrar solo los correspondientes a la  $f = 2,655 \text{ GHz}$ . Sin embargo, como demostración de la aplicación de SCM en el presente trabajo, se obtiene, en la figura A.1a, el espectro eléctrico generado por el Tx en CO correspondiente a 2.655 GHz y 5.665 GHz.

El espectro óptico que genera esta señal se puede visualizar en la figura A.1b. Se observan 4 bandas laterales, generadas al ser enviadas dos señales en distintas frecuencias, correspondiente a la teoría explicada en la sección 2.3.3.



(a) Analizador RF de la señal a transmitirse



(b) Espectro óptico en enlace DS en ODN

Figura A.1: Señales eléctricas y ópticas transmitidas de CO

La señal recuperada en el receptor a  $5,665\text{ GHz}$  y el respectivo diagrama de constelación de los bits recibidos se presentan en la figura A.2.

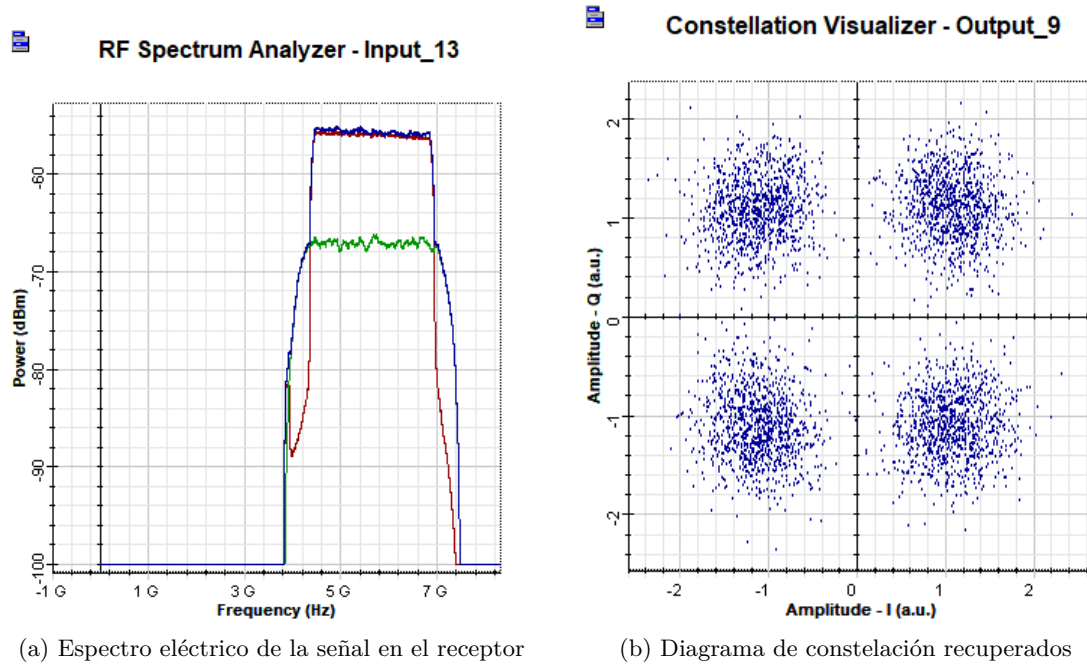


Figura A.2: Información obtenida en el receptor

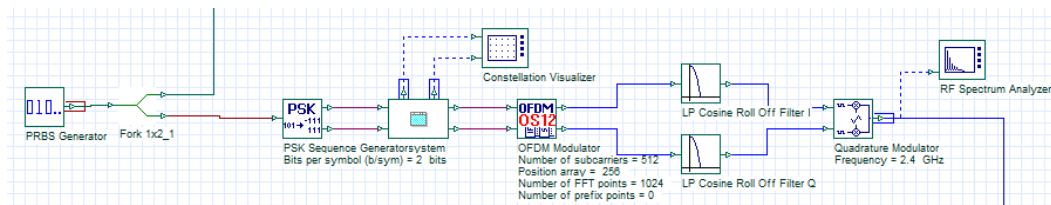


Figura A.3: Modulación QPSK

## A.2. Red completa GPON-RoF

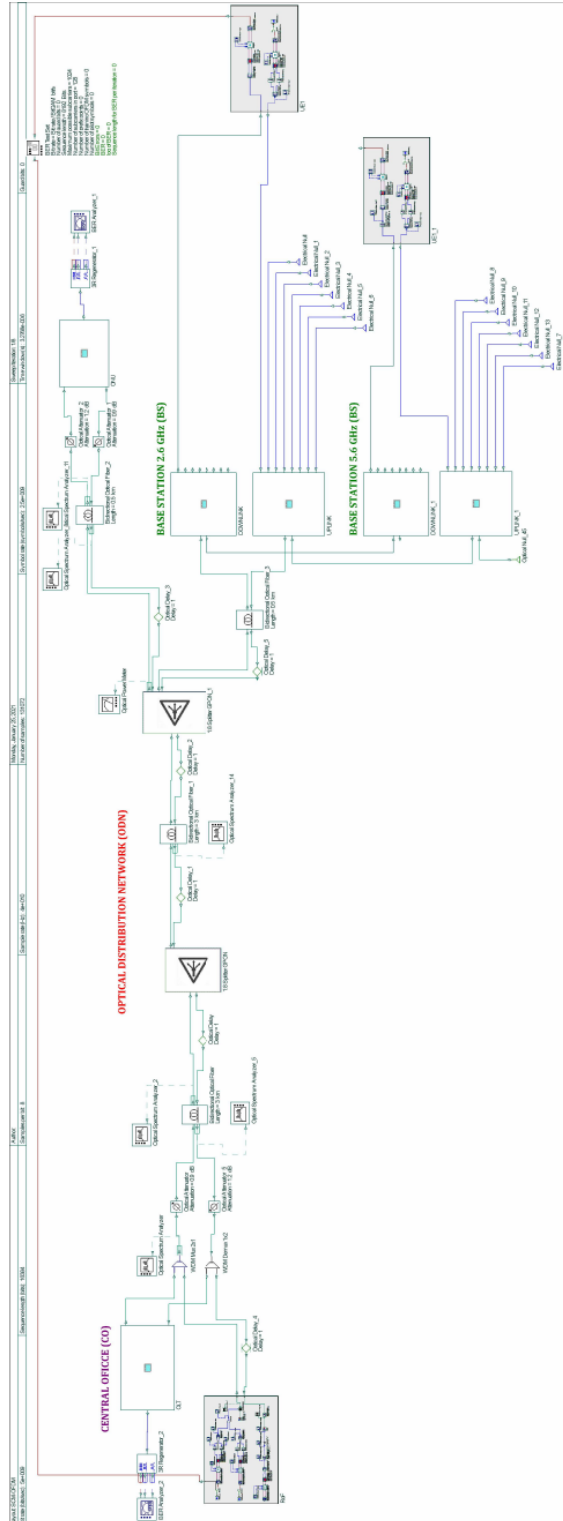


Figura A.4: Sistema completo para la simulación

### A.3. Modulación analógica sobre RoF

En esta sección se presenta la simulación de AM y FM sobre fibra óptica. La estructura de la red para ambos casos se puede observar en las figuras A.5 y A.6, respectivamente.

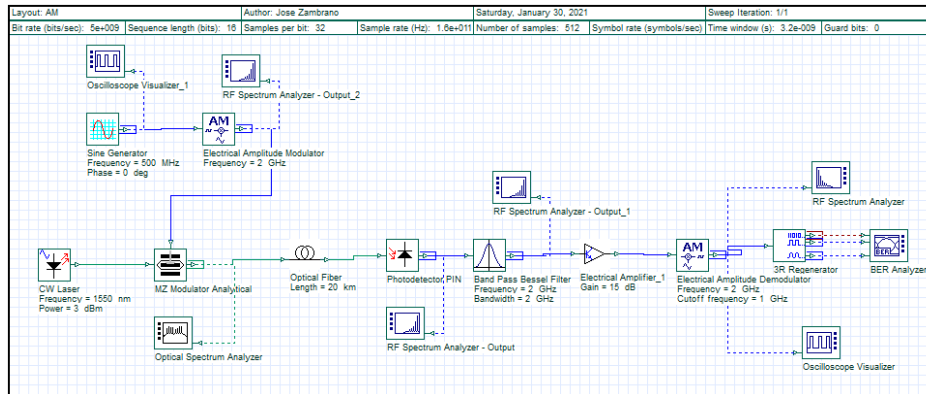


Figura A.5: Red para simulación de modulación AM

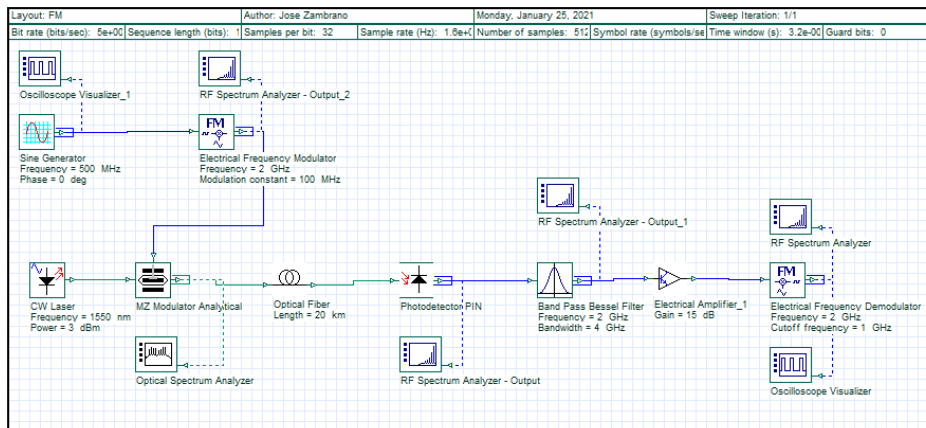
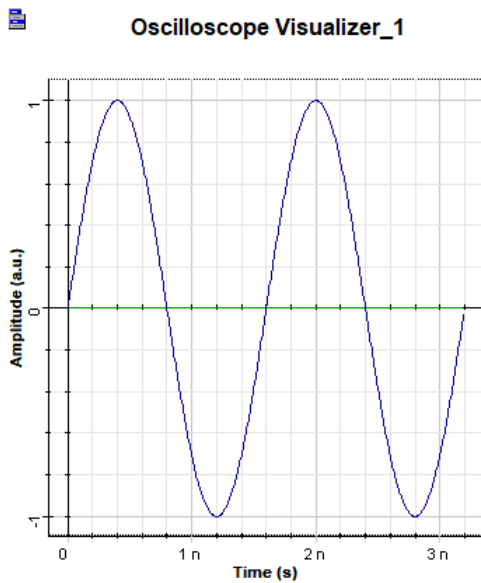
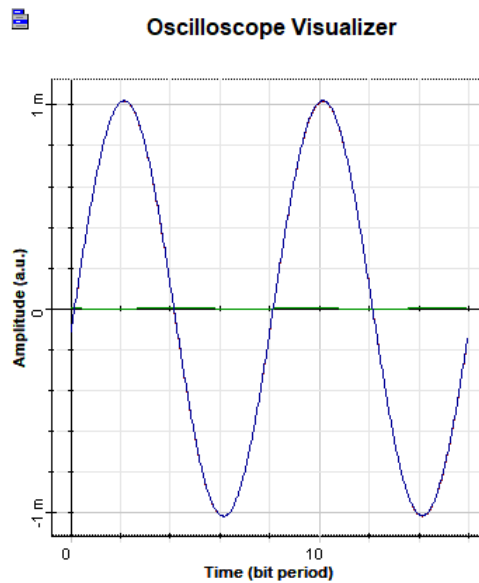


Figura A.6: Red para simulación de modulación FM

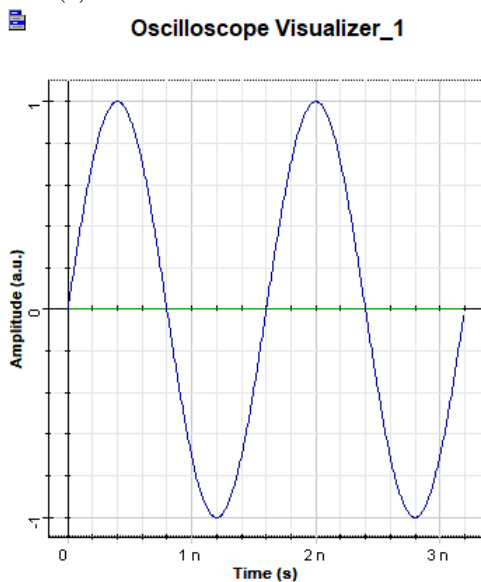
Los resultados obtenidos para ambas modulaciones se pueden observar en la figura A.7.



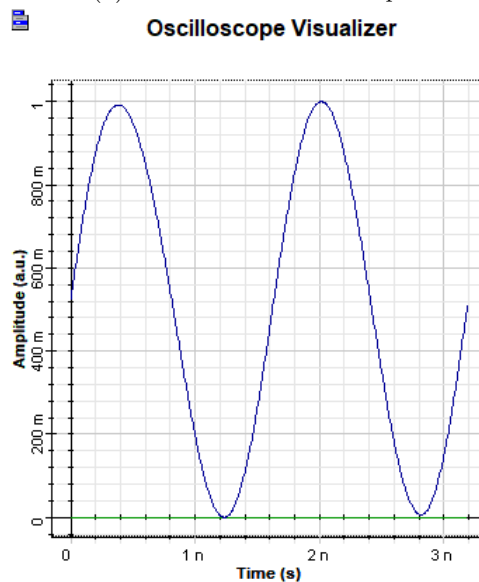
(a) Onda senoidal transmitida con AM



(b) Onda AM senoidal receptada



(c) Onda senoidal transmitida con FM



(d) Onda FM senoidal receptada

Figura A.7: Resultados de modulaciones analógicas

#### A.4. Modulación QPSK sobre RoF

Como se mencionó en el capítulo 3, para la implementación de la modulación QPSK sobre RoF, es necesario reemplazar el bloque QAM. Por lo tanto, el sistema transmisor quedaría como el mostrado en la figura A.3.

## A.5. Red de transporte Empresa No. 2

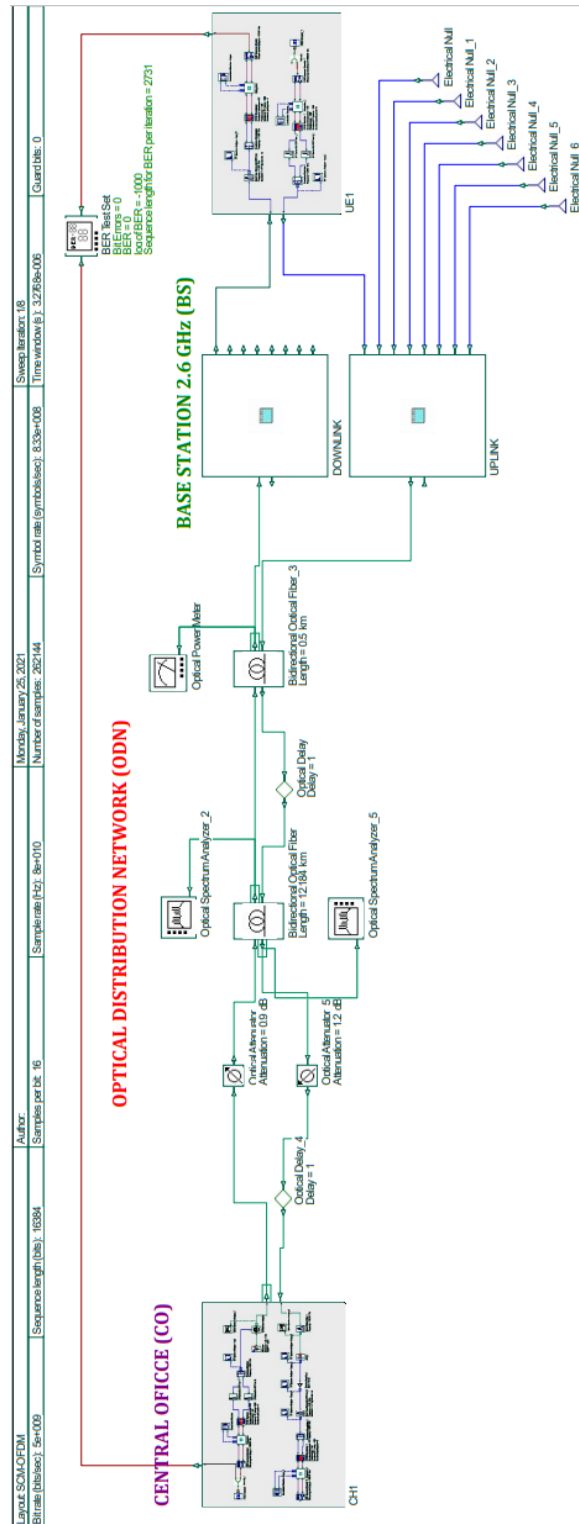


Figura A.8: Red de transporte de 12 Km



---

## Apéndice 2

### B.1. Código empleado para la interpolación polinómica

A continuación se presenta el código empleado para interpolar polinómico las 8 muestras adquiridas en cada simulación, el mismo se encuentra desarrollado en Octave y ofrece licencia gratuita. Ofrece lectura de un archivo en formato `.txt` de dos columnas y `n` filas, posterior promedio de todos los archivos y elaboración de la respectiva gráfica.

```
1
2 aux = zeros(1,8); % Variable calculo promedio BER
3 for i = 1:1:3
4     j = int2str(i);
5     nombreArch = strcat('64qamSim',j,'RoF.txt');
6     idArch = fopen(nombreArch,'r');
7     formatSpec = '%f\t%f';
8     sizeA = [2 Inf];
9     A = fscanf(idArch,formatSpec,sizeA);
10    fclose(idArch);
11    Prx = A(1,:) % Lectura de potencia rx
12    ber = A(2,:) % Lectura de BER
13    aux = aux + ber;
14 endfor
15
16 berProm = aux/3;
17
18 %-----RegresionBER-----
19 aux2 = linspace(-13.15,-6,15); % Puntos de evaluacion
20 p = polyfit(Prx,berProm,3); % Ajuste polinomial
21 reg = polyval(p,aux2); % Calculo con la curva
22 %-----Graficar puntos-----
23 figure
24 plot(Prx,berProm,'o');
25 hold on
26 plot(aux2,reg);
27 hold off
```



## B.2. Configuración de barrido

Para calcular resultados ante el cambio de una variable, es necesario configurar el simulador con múltiples iteraciones. Esta configuración se puede divisar en la figura B.1, donde inicialmente se debe seleccionar **Set total sweep iterations** (cuadro verde) y colocar el número deseado, posteriormente se debe ir a la variable de cada componente deseado y colocar en el parámetro **Mode = Sweep**. Una forma rápida de manipular todas las variables es dando clic en **Parameter Sweeps** (cuadro azul).

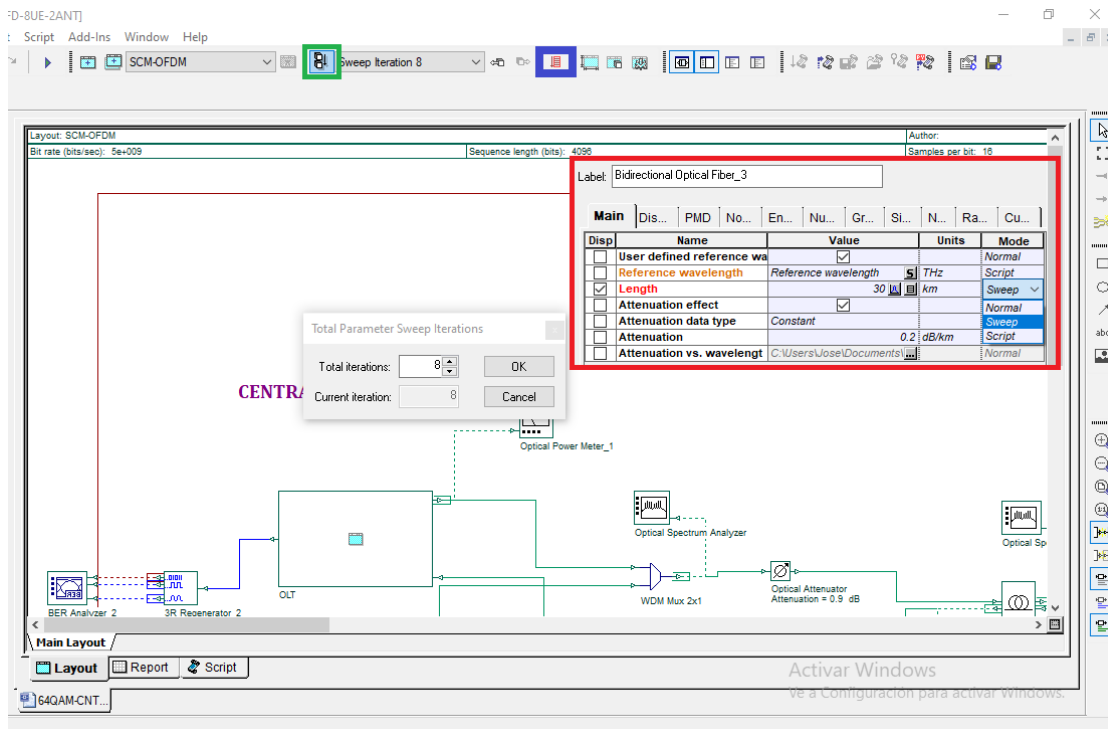


Figura B.1: Configuración de múltiples iteraciones

## B.3. Generación de reportes en Optisystem

OptiSystem ofrece la posibilidad de generar reportes de los resultados obtenidos, para lo cual es necesario dirigirse a la sección inferior del simulador, en la pestaña **Report**. En la figura B.2 se presenta la ventana con las indicaciones que deben seguirse tanto para graficar, como para exportar datos de gráficas. Primero se selecciona la opción **Opti2DGraph**, se arrastra al área de trabajo, luego se busca el componente en **Project Browser** y se selecciona la variable, la misma que se arrastra a la gráfica y se suelta en el eje que se desea. Si es necesario extraer los datos en formato **.txt**, se procede a hacer clic en la parte superior izquierda (cuadro azul) de la imagen y se selecciona exportar datos.

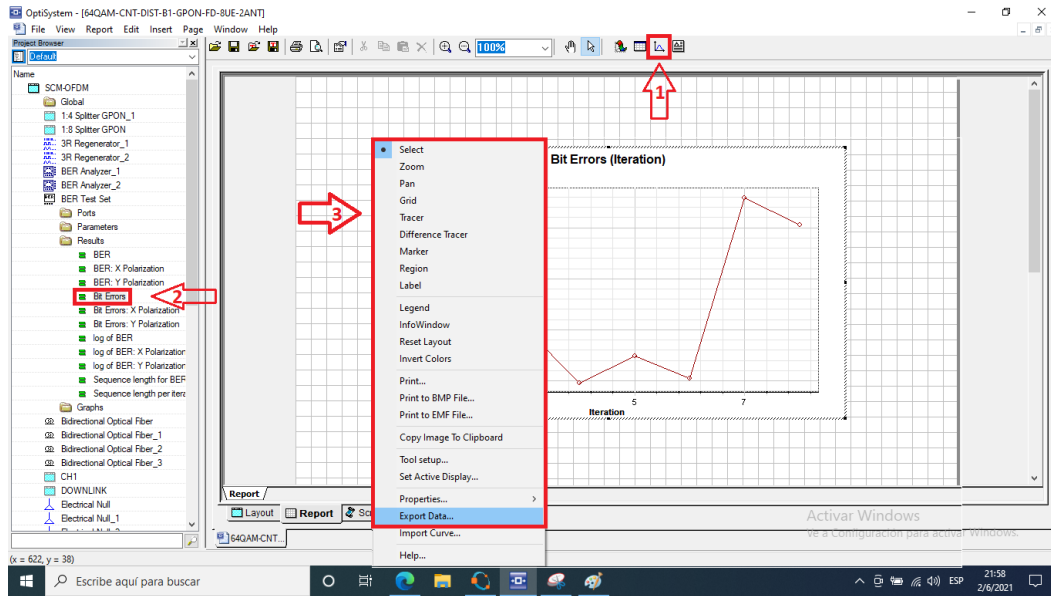


Figura B.2: Ventana de reportes. Instrucciones para graficar y exportar datos.

## B.4. Equipos RoF

Hoy en día existen en el mercado algunos equipos los cuales son utilizados para la implementación de RoF, entre estos equipos tenemos:



Figura B.3: Equipos Tx y RX para transmisión y recepción de RFoF de 0,01GHz-18GHz. Fuente: rfoptic.com



Figura B.4: Equipos Tx y RX para transmisión y recepción bidireccional de RFoF de 0,01GHz-5GHz.  
Fuente:www.rfoptic.com



Figura B.5: Equipos Tx y RX para transmisión y recepción bidireccional de RFoF de 0,01GHz-5GHz.  
Fuente:www.smw.se



Figura B.6: Equipos RFoF indoor chasis DEV 7113 Fuente:www.dev-systemtechnik.com

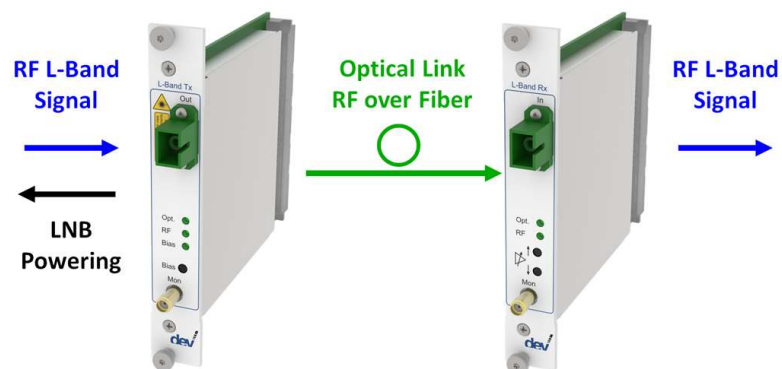


Figura B.7: Tarjetas RFoF de enlace en banda L- DEV 7232 Fuente:www.dev-systemtechnik.com



---

---

## Bibliografía

- [1] M. A. Jalil, "Radio-over-Fiber system Capacity Improvements by Using Wavelength Division Multiplexing and Subcarrier Multiplexing Techniques," *Engineering and Technology Journal*, num. January 2015, 2015. [En línea]. Disponible: <https://www.iasj.net/iasj?func=article{&}aId=105536>
- [2] A. Cooper, "Fibre/radio for the provision of cordless/mobile telephony services in the access network," *Electronics Letters*, vol. 26, 2002.
- [3] D. José, "Análisis de diagramas de ojo," *Departamento de Electrónica, Universidad Técnica Federico Santa María*, 06 2002.
- [4] A. Escallon Portilla y J. LIS, "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," Ph.D. dissertation, Universidad del Cauca, Mayo 2008.
- [5] D. E. L. A. S. Telecomunicaciones y D. E. L. A. Uit, "Recomendación O.201 (07/2003). Equipo de prueba del factor Q para evaluar la calidad de transmisión de canales ópticos," 2003.
- [6] R. Llorente y M. Beltrán, "Radio-over-Fibre Techniques and Performance," *Frontiers in Guided Wave Optics and Optoelectronics*, num. May, 2010.
- [7] M. A. Jalil, *Performance of Radio over Fiber (RoF) System: Single and Multi-wavelength*. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015.
- [8] M. A. Elmagzoub, A. Shaikh, A. Alghamdi, y K. Rajab, "A review on mimo wireless signals over fibre for next generation fibre wireless (FIWI) broadband networks," *Electronics (Switzerland)*, vol. 9, num. 12, pp. 1–31, 2020.
- [9] D. Wang, D. Chen, B. Song, N. Guizani, X. Yu, y X. Du, "From IoT to 5G I-IoT: The Next Generation IoT-Based Intelligent Algorithms and 5G Technologies," *IEEE Communications Magazine*, vol. 56, num. 10, pp. 114–120, 2018.
- [10] A. F. Escallón Portilla y V. H. Ruiz Cacheta, "EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO A NIVEL FÍSICO DE UN SISTEMA FTTH-GPON PARA SERVICIOS QUAD PLAY AL INTEGRAR UN MÓDULO RoF," Tech. Rep. April 2019, 2018. [En línea]. Disponible: <http://repositorio.unicauca.edu.co:8080/bitstream/handle/123456789/1321/Anexos.pdf?sequence=3{&}isAllowed=y>
- [11] S. Ahmad Niazi, "Integration of Hybrid Passive Optical Networks (PON) with Radio over Fiber (RoF)," *RF Systems, Circuits and Components*, 2019.



- [12] A. H. Ali y A. D. Farhood, "Design and performance analysis of the WDM schemes for radio over fiber system with different fiber propagation losses," *Fibers*, vol. 7, num. 3, 2019.
- [13] G. Uit-t, "Supervisión óptica para sistemas de multiplexación por división en longitud de onda densa. G.697," 2012.
- [14] B. Ait Ahmed, O. Aghzout, C. Mounia, F. Chaoui, y A. NAGHAR, "Transmission performance analysis of wdm radio over fiber technology for next generation long-haul optical networks," *International Journal of Optics*, vol. 2019, pp. 1–9, 01 2019.
- [15] B. G. Kim, S. H. Bae, H. Kim, y Y. C. Chung, "Rof-based mobile fronthaul networks implemented by using dml and eml for 5g wireless communication systems," *J. Lightwave Technol.*, vol. 36, num. 14, pp. 2874–2881, Jul 2018. [En línea]. Disponible: <http://jlt.osa.org/abstract.cfm?URI=jlt-36-14-2874>
- [16] M. Sung, J. Kim, E. Kim, S. Cho, Y. Won, B. Lim, S. Pyun, H. Lee, J. K. Lee, y J. H. Lee, "Rof-based radio access network for 5g mobile communication systems in 28 ghz millimeter-wave," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 38, num. 2, pp. 409–420, Jan 2020.
- [17] Z. Zakrzewski, "D-rof and a-rof interfaces in an all-optical fronthaul of 5g mobile systems," *Applied Sciences*, vol. 10, num. 4, 2020. [En línea]. Disponible: <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/4/1212>
- [18] D. Rusdiyanto y C. Apriono, "Radio over fiber for implementing digital television network in indonesia," in *2020 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA)*, 2020, pp. 321–325.
- [19] S. Pipatsart, A. Afrozeh, J. Ali, y P. Yupapin, "Nano radio and rof applications," *Procedia Engineering*, vol. 32, pp. 1–12, 2012, iSEEC. [En línea]. Disponible: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705812012611>
- [20] J. Seoane, I. Monroy, K. Prince, y P. Jeppesen, "Local-Oscillator-Free Wireless-Optical-Wireless Data Link at 1.25 Gbps over a 40 GHz Carrier Employing Carrier Preservation and Envelope Detection," *Optical Society of America*, 2008.
- [21] Z. Dong, F. N. Khan, Q. Sui, K. Zhong, C. Lu, y A. P. T. Lau, "Optical Performance Monitoring: A Review of Current and Future Technologies," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 34, num. 2, pp. 525–543, 2016.
- [22] A. F. Escallón-Portilla, V. H. Ruiz-Guachetá, y J. G. López-Perafán, "Evaluación del desempeño físico de un sistema FTTH-GPON para servicios Quad Play después de la incorporación de un módulo RoF," *TecnoLógicas*, vol. 23, num. 47, pp. 23–61, 2020.
- [23] M. Sung, S. H. Cho, J. Kim, J. K. Lee, J. H. Lee, y H. S. Chung, "Demonstration of IFoF-Based Mobile Fronthaul in 5G Prototype with 28-GHz Millimeter wave," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 36, num. 2, pp. 601–609, 2018.
- [24] L. Pei, H. You, T. Ning, J. Li, S. Gao, y L. Yang, "Bidirectional 60 GHz RoF system with two millimeter-wave signals generated by a novel generation scheme," *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 4, num. 9, pp. 703–708, 2012.



- [25] U. Habib, M. Steeg, A. Stöhr, y N. J. Gomes, “Radio-over-Fiber-supported Millimeter-wave Multiuser Transmission with Low-Complexity Antenna Units,” *MWP 2018 - 2018 International Topical Meeting on Microwave Photonics*, num. October, 2018.
- [26] M. Christine, A. Hambali, y K. Sujatmoko, “Performance analysis of radio over fiber network for indoor telecommunication application,” *Proceedings - 2019 IEEE Asia Pacific Conference on Wireless and Mobile, APWiMob 2019*, pp. 19–22, 2019.
- [27] R. Singh, M. Ahlawat, y D. Sharma, “A Review on Radio over Fiber communication System,” *International Journal of All Research Education and Scientific Methods (IJARESM)*, vol. 5, num. 4, pp. 2455–6211, 2017.
- [28] B. Wang, L. Peng, y P. H. Ho, “Energy-efficient radio-over-fiber system for next-generation cloud radio access networks,” *Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2019, num. 1, 2019.
- [29] F. Khair, H. P. Fakhriy, I. W. Mustika, B. Setiyanto, y S. M. Idrus, “Modeling and simulation of OFDM scheme for radio over fiber (RoF),” *ICITACEE 2015 - 2nd International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering: Green Technology Strengthening in Information Technology, Electrical and Computer Engineering Implementation, Proceedings*, num. October, pp. 376–381, 2016.
- [30] M. Gagnaire, “Analog and Digitized Radio-over-Fiber,” in *Fiber-Wireless Convergence in Next-Generation Communication Networks*. Springer International Publishing, 2017, ch. 4. [En línea]. Disponible: <https://www.springerprofessional.de/en/analog-and-digitized-radio-over-fiber/11979984>
- [31] H. T. C. L. Ericsson AB, A. L. NEC Corporation, y N. Networks., “Cpri specification v7.0,” *2015 Interface Specification*, pp. 1–128, 2015. [En línea]. Disponible: [http://www.cpri.info/downloads/CPRI\\_v\\_7\\_0\\_2015-10-09.pdf](http://www.cpri.info/downloads/CPRI_v_7_0_2015-10-09.pdf)
- [32] —, “ecpri specification v2.0,” *2019 Interface Specification*, pp. 1–109, 2019. [En línea]. Disponible: [http://www.cpri.info/downloads/eCPRI\\_v\\_2.0\\_2019\\_05\\_10c.pdf](http://www.cpri.info/downloads/eCPRI_v_2.0_2019_05_10c.pdf)
- [33] J. O. Garcia Lozano, “FTTx y sus aplicaciones,” *Telemediciones*, 2016.