

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA, INFORMÁTICA
Y MECÁNICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA



TESIS

**ANÁLISIS COMPARATIVO DEL RENDIMIENTO DE UNA RED GPON
IMPLEMENTADA EN EL CENTRO HISTÓRICO DE LA CIUDAD DEL CUSCO CON
REDES XGS-PON Y NG-PON2**

PRESENTADO POR:

Br. BRONY EDUARDO CONDORI CAPARO

**PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL
DE INGENIERO ELECTRÓNICO**

ASESOR:

M. Sc. Ing. JORGE LUIS ARIZACA CUSICUNA

CUSCO - PERÚ

2024

INFORME DE ORIGINALIDAD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-303-2020-UNSAAC)

El que suscribe, Asesor del trabajo de investigación/tesis titulada: "ANÁLISIS COMPARATIVO DEL RENDIMIENTO DE UNA RED GPON IMPLEMENTADA EN EL CENTRO HISTÓRICO DE LA CIUDAD DEL CUSCO CON REDES XGS-PON Y NG-PON2"

presentado por: Biony Eduardo Condori Coparó con DNI Nro.: 76453260 presentado por: con DNI Nro.: para optar el título profesional/grado académico de INGENIERO ELECTRÓNICO

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 03 veces, mediante el Software Antiplagio, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso de Sistema Antiplagio de la UNSAAC** y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 9 %.

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No se considera plagio.	X
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las correcciones.	
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, quien a su vez eleva el informe a la autoridad académica para que tome las acciones correspondientes. Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	

Por tanto, en mi condición de asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y adjunto la primera página del reporte del Sistema Antiplagio.

Cusco, 13 de Noviembre de 2024


Firma
Post firma Jorge Luis Arizaca Cusicunga

Nro. de DNI 42348406

ORCID del Asesor 0000-0003-2658-5492

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema Antiplagio: oid: 27259:405014884

NOMBRE DEL TRABAJO

VOLUMEN DE TESIS Brony CC.pdf

AUTOR

Brony Eduardo Condori Caparo

RECUENTO DE PALABRAS

40633 Words

RECUENTO DE CARACTERES

209997 Characters

RECUENTO DE PÁGINAS

225 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO

7.1MB

FECHA DE ENTREGA

Nov 13, 2024 11:03 AM GMT-5

FECHA DEL INFORME

Nov 13, 2024 11:05 AM GMT-5

● 9% de similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos.

- 8% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 4% Base de datos de trabajos entregados
- 0% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

● Excluir del Reporte de Similitud

- Material bibliográfico
- Coincidencia baja (menos de 10 palabras)
- Material citado

Dedicatoria

Este trabajo de investigación va dedicado con una especial admiración y gratitud a mis padres que, a pesar de las dificultades, me brindaron su apoyo incondicional siendo parte fundamental de mi crecimiento personal.

A mi familia y amigos que, a pesar de haber cometido muchos errores, siempre estuvieron presentes, supieron escucharme y darme consejos para poder lograr este trabajo y seguir logrando mis metas.

Agradecimientos

Agradezco a todos los familiares y amigos que fueron de gran apoyo y parte de este proceso para llevar a cabo este trabajo, especialmente a mis padres que, con sus experiencias y enseñanzas, he logrado realizar esta parte de mi formación profesional y pueda seguir realizando proyectos futuros.

A mi asesor M. Sc. Jorge Luis Arizaca Cusicuna, por las valiosas lecciones que me brindó durante mi etapa como estudiante y por haber sido un referente en la realización de este trabajo de investigación, a los docentes y compañeros que conforman el laboratorio de telecomunicaciones LIISTI por el ambiente acogedor en el que pude realizar este trabajo, a mis amigos y compañeros de la escuela por las experiencias y anécdotas vividas; y por último agradecer a la empresa Internet Perú Cable S.A.C., por brindarme las herramientas necesarias para realizar este trabajo de investigación.

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
RESUMEN.....	XV
ABSTRACT	XVI
CAPÍTULO I: GENERALIDADES	1
1.1. Introducción	1
1.2. Planteamiento del problema	2
1.1.1. Problema general.....	5
1.2.1. Problemas específicos	6
1.3. Justificación.....	6
1.4. Objetivos	7
1.4.1. Objetivo general	7
1.4.2. Objetivos específicos.....	7
1.5. Alcances	8
1.6. Limitaciones	8
1.7. Metodología	9
1.8. Variables.....	9
1.8.1. Variables independientes.....	9
1.8.2. Variables dependientes.....	9
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	10
2.1. Antecedentes	10
2.2. Fibra óptica.....	11
2.2.1. Atenuación	13
2.2.2. Dispersión.....	14

2.3.	Transmisores y Receptores ópticos	15
2.3.1.	Codificación NRZ	16
2.3.2.	Láseres	16
2.3.3.	Moduladores ópticos	17
2.3.4.	Filtros ópticos y fotodetectores	18
2.4.	Técnicas de multiplexación en la fibra óptica	20
2.4.1.	Multiplexación por división de tiempo (TDM):.....	20
2.4.2.	Multiplexación por división de longitud de onda (WDM):.....	20
2.5.	Redes de fibra óptica hasta el hogar (FTTH)	21
2.6.	Redes ópticas pasivas (PON)	22
2.6.1.	Terminal de línea óptica (OLT)	23
2.6.2.	Red de distribución óptica (ODN)	23
2.6.3.	Unidad de red óptica (ONU)	23
2.6.4.	Elementos de interconexión en una red óptica pasiva.....	24
2.7.	Tecnología GPON	29
2.7.1.	Funcionamiento de una red GPON	30
2.7.2.	Arquitectura de red de acceso GPON	33
2.7.3.	Especificaciones técnicas	33
2.7.4.	Parámetros en la interfaz óptica en sentido descendente	35
2.8.	Tecnología XGS-PON.....	37
2.8.1.	Arquitectura de red de acceso XGS-PON	37
2.8.2.	Especificaciones técnicas	38
2.8.3.	Parámetros en la interfaz óptica en sentido descendente	39
2.9.	Tecnología NG-PON2.....	41
2.9.1.	Arquitectura de red de NG-PON2.....	41

2.9.2.	Especificaciones técnicas	42
2.9.3.	Parámetros de la interfaz óptica en sentido descendente para NG-PON2	43
2.9.4.	Capacidad de sintonización de longitud de onda en las ONU	45
2.10.	Parámetros del rendimiento de un sistema	46
2.10.1.	Tasa de error de Bits (BER)	46
2.10.2.	Diagrama del ojo	46
2.10.3.	Factor Q	47
CAPÍTULO III: DESCRIPCIÓN Y EVALUACIÓN DE LA RED		49
3.1.	Descripción de la red	49
3.1.1.	Zona de estudio	50
3.1.2.	Control y administración de la red GPON	51
3.1.3.	Elementos y equipos de transmisión	53
3.1.3.1.	Imágenes del nodo transmisor Arcopata	55
3.1.4.	Red de distribución óptica y elementos ópticos de planta externa	57
3.1.4.1.	Imágenes de elementos de la ODN de la red y mediciones de potencia	62
3.1.5.	Equipos y elementos de recepción	65
3.2.	Evaluación del enlace óptico de la red	68
3.2.1.	Evaluación de la pérdida óptica del usuario más lejano	71
3.2.2.	Evaluación de la dispersión y tiempo de sistema del usuario más lejano	73
3.2.3.	Evaluación del Factor Q y BER a partir de la relación señal a ruido óptico	77
3.2.4.	Evaluación de las capacidades y escalabilidad	79
CAPITULO IV: SIMULACIÓN DE LAS REDES PON		82
4.1.	Software de simulación	82
4.2.	Desarrollo de la simulación	84
4.2.1.	Simulación de la red GPON	86

4.2.2.	Simulación de la red XGS-PON.....	95
4.2.3.	Simulación de la red NG-PON2.....	103
CAPITULO V: ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS REDES PON		112
5.1.	Resultados obtenidos de parámetros de rendimiento de la simulación.....	112
5.1.1.	Resultados de GPON clase B+.....	112
5.1.2.	Resultados de XGS-PON clase N2	113
5.1.3.	Resultados de NG-PON2 clase N2.....	114
5.2.	Análisis comparativo del rendimiento a diferentes potencias de recepción.....	119
5.2.1.	Datos obtenidos y análisis	122
5.2.2.	Relación entre el Factor Q y la potencia de recepción	141
5.3.	Análisis comparativo de las tecnologías PON con relaciones de 1:128 y 1:256	153
5.3.1.	Resultados para divisiones de 1:128 y 1:256	154
5.4.	Comparativo económico de equipos OLT y ONU	170
CAPÍTULO VI: COSTOS Y PRESUPUESTO		173
6.1.	Costos y presupuesto de equipos y materiales utilizados en el trabajo de tesis	173
CONCLUSIONES		174
RECOMENDACIONES		176
REFERENCIAS		177
ANEXOS.....		183

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Longitudes de Onda más usadas en función del tipo de fibra.....	12
Tabla 2. Clases de pérdida en el trayecto óptico para GPON	35
Tabla 3. Parámetros de la interfaz óptica en sentido descendente para GPON	36
Tabla 4. Clases de pérdida en el trayecto óptico para XGS-PON.....	39
Tabla 5. Parámetros de la interfaz óptica en sentido descendente para XGS-PON	40
Tabla 6. Longitudes de onda operativas de NG-PON2.....	42
Tabla 7. Frecuencias centrales en sentido descendente para TWDM-PON.....	43
Tabla 8. Clases de pérdida en el trayecto óptico para NG-PON2	43
Tabla 9. Parámetros de la interfaz óptica en sentido descendente para NG-PON2	44
Tabla 10. Especificaciones técnicas OLT Optictimes LT-RG8608.....	53
Tabla 11. Parámetros de SFP GPON Furukawa clase B+.....	54
Tabla 12. Leyenda de elementos de la ODN.....	60
Tabla 13. Coordenadas geográficas de las derivaciones y de cajas NAP actuales	61
Tabla 14. Unidades de red óptica (ONU) utilizados en la red	66
Tabla 15. Clases extendidas B+/C+	68
Tabla 16. Datos del enlace óptico del usuario más lejano	70
Tabla 17. Comparativo de la pérdida óptica	72
Tabla 18. Comparativo de la dispersión y tiempo de sistema.....	76
Tabla 19. Factor Q a partir de la OSNR y características del receptor de cada tecnología	78
Tabla 20. Evaluación de capacidades y escalabilidad.....	79
Tabla 21. Actividades principales y su consumo de datos	80
Tabla 22. Comparativo del rendimiento en sentido descendente.....	118
Tabla 23. Resultados del Factor Q	123
Tabla 24. Resultados BER	124

Tabla 25. Resultados Log (BER)	125
Tabla 26. Diferencia del Factor Q (XGS-PON y NG-PON2 con respecto a GPON).....	131
Tabla 27. Diferencia del Factor Q (XGS-PON con respecto a NG-PON2).....	134
Tabla 28. Mejora porcentual del Factor Q de XGS-PON y NG-PON2 con respecto a GPON ...	137
Tabla 29. Mejora porcentual del Factor Q de XGS-PON con respecto a NG-PON2	139
Tabla 30. Error entre datos obtenidos y ecuación estimada (GPON)	146
Tabla 31. Error entre datos obtenidos y ecuación estimada (XGS-PON).....	147
Tabla 32. Error entre datos obtenidos y ecuación estimada (NG-PON2 187.8 THz).....	148
Tabla 33. Error entre datos obtenidos y ecuación estimada (NG-PON2 187.7 THz).....	149
Tabla 34. Error entre datos obtenidos y ecuación estimada (NG-PON2 187.6 THz).....	150
Tabla 35. Error entre datos obtenidos y ecuación estimada (NG-PON2 187.5 THz).....	151
Tabla 36. Datos obtenidos mediante regresión exponencial	152
Tabla 37. Resultados del rendimiento para las diferentes divisiones.....	161
Tabla 38. Diferencia entre Prx, Factor Q y mejora porcentual con respecto a GPON en las diferentes relaciones.....	164
Tabla 39. Resumen comparativo de las tres tecnologías.....	169
Tabla 40. Marcas y modelos de algunos equipos terminales PON	170
Tabla 41. Comparativo económico	171
Tabla 42. Costo de equipos y materiales.....	173
Tabla 43. Rubro de inversión	173

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1. Evolución de conexiones de fibra y participación según tecnología de acceso hasta el 2023 [2]	3
Fig. 2. Conexiones de fibra óptica en regiones el 2023 [3].....	3
Fig. 3. Tipos de fibra según el diámetro del núcleo [10]	12
Fig. 4. Atenuación y dispersión en la fibra óptica monomodo [6].....	15
Fig. 5. Codificación RZ y NRZ [12]	16
Fig. 6. Características de láseres FP y DFB [13]	17
Fig. 7. Capacidad de respuesta vs Longitud de onda de un fotodiodo APD (InGaAs) [16]	19
Fig. 8. Curva de ganancia de un fotodiodo de silicio [17]	19
Fig. 9. Multiplexación CWDM y DWDM [18]	21
Fig. 10. Topología en estrella y árbol [20].....	22
Fig. 11. Red óptica pasiva (PON) [21].....	24
Fig. 12. Módulo SFP GPON [22].....	24
Fig. 13. Tipos de conectores de fibra óptica [23].....	25
Fig. 14. Patchcord SC/UPC-SC/APC monomodo [24].....	25
Fig. 15. Distribuidor de fibra óptica [25]	26
Fig. 16. Fibra óptica monomodo ADSS G.652.D [26]	27
Fig. 17. Mufa de empalme tipo domo [27]	27
Fig. 18. Splitter óptico 1x4 SC/APC [28]	28
Fig. 19. Caja NAP [29].....	28
Fig. 20. Fibra monomodo G.657.A [30]	29
Fig. 21. Conector rápido SC/APC [31]	29
Fig. 22. (a) Envío de paquetes sentido descendente (b) Proceso de comunicación descendente [34]	30
Fig. 23. PCBd y carga útil de GTC [34].....	31

Fig. 24. (a) Envío de paquetes sentido ascendente (b) Proceso de comunicación ascendente [34]	32
Fig. 25. Trama descendente y ascendente [34]	33
Fig. 26. Arquitectura de red GPON [35]	33
Fig. 27. Asignación de longitudes de onda GPON [35]	34
Fig. 28. Arquitectura de red XGS-PON [36]	38
Fig. 29. Asignación de longitudes de onda para XGS-PON [36]	39
Fig. 30. Arquitectura de red de NG-PON2 [38]	41
Fig. 31. Diagrama de ojo [39]	46
Fig. 32. Factor Q a partir del diagrama de ojo [41]	47
Fig. 33. Zona de estudio	50
Fig. 34. Recorrido de la fibra de interconexión de la central con nodo Arcopata	51
Fig. 35. Diagrama de interconexión entre la central y la OLT [43], [44], [45]	52
Fig. 36. OLT Optictimes LT-RG8608 8 puertos GPON [45]	53
Fig. 37. Interconexión entre la OLT y elementos que integran el transmisor	55
Fig. 38. (a) Equipos de activos del nodo transmisor (b) Conexiones entre equipos (c) ODF (d) Potencia de Tx de un SFP GPON clase B+	56
Fig. 39. Troncales y derivaciones de la red GPON	58
Fig. 40. Propuesta de diseño para la red GPON del centro histórico	59
Fig. 41. Distribución actual de la red GPON	60
Fig. 42. (a) Salida del cable ADSS del nodo. Derivaciones: (b) E1 (c) E2 (d) E5 (e) E8 (f) E9 ...	62
Fig. 43. Cajas de distribución: (a) Nap5-E5 (b) Nap4-E5 (c) Nap2-E5 (d) Nap1-E7 (e) Nap2-E10 (f) Nap1-E10	63
Fig. 44. Potencia medida en: (a) Nap3-E5 (b) Nap2-E5 (c) Nap1-E7	64
Fig. 45. Potencias de recepción en las ONU de E5	67
Fig. 46. Potencias de recepción en las ONU de E7	67
Fig. 47. Diagrama general de interconexión de la red GPON	69

Fig. 48. Recorrido del enlace de fibra hasta la caja NAP más lejana (NAP1-E10)	69
Fig. 49. (a) Splitter de primer nivel 1x8 (b) Pérdida en empalme por fusión	71
Fig. 50. Software Optisystem v7 [52]	82
Fig. 51. Interfaz gráfica de Optisystem [52]	83
Fig. 52. Representación de la ODN del usuario más lejano en Optisystem.....	85
Fig. 53. Bloque del puerto GPON clase B+.....	87
Fig. 54. Configuraciones realizadas en el bloque del puerto GPON.....	88
Fig. 55. (a) Potencia de salida en el ODF (b) Espectro de la señal de salida (c) Señal de salida (GPON)	89
Fig. 56. ODN para GPON.....	90
Fig. 57. Configuraciones realizadas para la ODN GPON.....	91
Fig. 58. Potencia medida en el splitter de segundo nivel	91
Fig. 59. Bloque de la unidad de red óptica GPON.....	92
Fig. 60. Configuraciones realizadas en el bloque ONU GPON	93
Fig. 61. (a) Potencia de recepción (b) Espectro (c) Señal recibida y señal filtrada (GPON).....	94
Fig. 62. Bloque del puerto XGS-PON clase N2.....	96
Fig. 63. Configuraciones realizadas en el puerto XGS-PON.....	97
Fig. 64. (a) Potencia de salida en el ODF (b) Espectro de la señal de salida (c) Señal de salida (XGS-PON).....	98
Fig. 65. ODN para XGS-PON.....	99
Fig. 66. Configuraciones realizadas ODN XGS-PON	100
Fig. 67. Potencia de recepción en splitter de segundo nivel XGS-PON.....	100
Fig. 68. Bloque de la ONU XGS-PON	101
Fig. 69. Configuraciones realizadas en la ONU XGS-PON	101
Fig. 70. (a) Potencia de recepción (b) Espectro (c) Señal recibida y señal filtrada (XGS-PON)	102
Fig. 71. Bloque del puerto NG-PON2 clase N2.....	104

Fig. 72. Configuraciones realizadas en el bloque del puerto NG-PON2	105
Fig. 73. (a) Potencias de salida de cada canal (b) Espectro de la señal (c) Señal de salida en 187.8 THz.....	106
Fig. 74. ODN para NG-PON2.....	107
Fig. 75. Configuraciones realizadas ODN NG-PON2	108
Fig. 76. Espectro de la señal en el splitter de segundo nivel.....	108
Fig. 77. Bloque ONU de NG-PON2	109
Fig. 78. Configuraciones realizadas ONU NG-PON2	110
Fig. 79. (a) Potencias de recepción en los 4 canales (b) Espectro en 187.8 THz (c) Señal recibida y señal filtrada en 187.8 THz	111
Fig. 80. Analizador de diagrama de ojo	112
Fig. 81. Diagrama de ojo obtenido para GPON clase B+	113
Fig. 82. Diagrama de ojo obtenido para XGS-PON clase N2.....	114
Fig. 83. Diagrama de ojo obtenido para 187.8 THz.....	115
Fig. 84. Diagrama de ojo obtenido para 187.7 THz.....	116
Fig. 85. Diagrama de ojo obtenido para 187.6 THz.....	117
Fig. 86. Diagrama de ojo obtenido para 187.5 THz.....	118
Fig. 87. Ubicación del atenuador en la ONU GPON	120
Fig. 88. Ubicación del atenuador en la ONU XGS-PON.....	120
Fig. 89. Ubicación de atenuadores en la ONU NG-PON2.....	121
Fig. 90. Potencias de recepción iniciales para: (a) GPON (b) XGS-PON (c) NG-PON2.....	122
Fig. 91. Gráfico comparativo 1: (a) Factor Q (b) Log (BER).....	126
Fig. 92. Gráfico comparativo 2: (a) Factor Q (b) Log (BER).....	127
Fig. 93. Gráfico comparativo 3: (a) Factor Q (b) Log (BER).....	128
Fig. 94. Gráfico comparativo 4: (a) Factor Q (b) Log (BER).....	129
Fig. 95. Diferencia del Factor Q entre XGS-PON y NG-PON2 con respecto a GPON	132

Fig. 96. Diferencia del Factor Q entre XGS-PON con respecto a NG-PON2	135
Fig. 97. Mejora porcentual del Factor Q con respecto a GPON	138
Fig. 98. Mejora porcentual del Factor Q de XGS-PON con respecto a NG-PON2	140
Fig. 99. Curva exponencial estimada (GPON).....	142
Fig. 100. Curva exponencial estimada (XGS-PON)	142
Fig. 101. Curva exponencial estimada (NG-PON2 187.8 THz)	143
Fig. 102. Curva exponencial estimada (NG-PON2 187.7 THz)	143
Fig. 103. Curva exponencial estimada (NG-PON2 187.7 THz)	144
Fig. 104. Curva exponencial estimada (NG-PON2 187.6 THz)	144
Fig. 105. ODN con cambio de splitter de segundo nivel	153
Fig. 106. Potencia recibida y diagrama de ojo para una división de 1:128.....	154
Fig. 107. Potencia recibida y diagrama de ojo para una división de 1:256.....	155
Fig. 108. Potencia recibida y diagrama de ojo para una división de 1:128.....	155
Fig. 109. Potencia recibida y diagrama de ojo para una división de 1:256.....	156
Fig. 110. Potencia recibida y diagrama de ojo para una división de 1:128 (187.8 THz).....	156
Fig. 111. Potencia recibida y diagrama de ojo para una división de 1:128 (187.7 THz).....	157
Fig. 112. Potencia recibida y diagrama de ojo para una división de 1:128 (187.6 THz).....	157
Fig. 113. Potencia recibida y diagrama de ojo para una división de 1:128 (187.5 THz).....	158
Fig. 114. Potencia recibida y diagrama de ojo para una división de 1:256 (187.8 THz).....	158
Fig. 115. Potencia recibida y diagrama de ojo para una división de 1:256 (187.7 THz).....	159
Fig. 116. Potencia recibida y diagrama de ojo para una división de 1:256 (187.6 THz).....	159
Fig. 117. Potencia recibida y diagrama de ojo para una división de 1:256 (187.5 THz).....	160
Fig. 118. Potencias de recepción para las diferentes divisiones.....	161
Fig. 119. Factor Q para las diferentes divisiones	162
Fig. 120. Log (BER) para las diferentes divisiones	162

Fig. 121. Diferencia de potencias de recepción para las diferentes divisiones 165

Fig. 122. Diferencia del Factor Q con respecto a GPON para las diferentes divisiones..... 165

Fig. 123. Mejora porcentual del Factor Q con respecto a GPON para las diferentes divisiones . 166

RESUMEN

Este trabajo de investigación tiene como finalidad el análisis comparativo de una red de fibra hasta el hogar (FTTH) con tecnología GPON, implementada en el Centro Histórico de la Ciudad del Cusco, con redes ópticas pasivas de nueva generación como son XGS-PON y NG-PON2 mediante una simulación para evaluar su rendimiento, así como sus ventajas y desventajas tecnológicas y económicas. Para ello se realizó una descripción del diseño y despliegue de esta red GPON actualmente, de la cual se tomaron datos experimentales como la potencia de transmisión, longitud de onda de operación del transmisor (OLT) que está ubicado en Arcopata; los elementos que conforman la red de distribución óptica (ODN), la distancia aproximada de interconexión a las cajas terminales y usuarios, así como las potencias de recepción; por lo que seguidamente, de acuerdo a estos datos, se realizó una simulación, del usuario más lejano. Posteriormente se realizó la simulación de las tecnologías XGS-PON y NGPON2, bajo las mismas condiciones de la ODN del usuario más lejano, pero teniendo en cuenta las especificaciones técnicas de estas tecnologías como son los parámetros de transmisión y recepción. Luego con los datos obtenidos del software de simulación Optisystem, se realizó el análisis comparativo de los parámetros de rendimiento de las tecnologías mencionadas, llegando a la conclusión que estas nuevas tecnologías ofrecen un mejor rendimiento y escalabilidad para mayor cantidad de usuarios. Con XGS-PON ofreciendo un mejor equilibrio en costo y rendimiento, siendo una mejor opción para los usuarios de la zona de estudio.

Palabras clave — FTTH, OLT, ODN, ONU, GPON, XGS-PON, NG-PON2, Factor Q, Tasa de error de bit (BER), Diagrama de ojo.

ABSTRACT

This research aims to conduct a comparative analysis of a fiber-to-the-home (FTTH) network using GPON technology, implemented in the Historic Center of the City of Cusco, with next-generation passive optical networks such as XGS-PON and NG-PON2 through a simulation to evaluate their performance, as well as their technological and economic advantages and disadvantages. For this purpose, a description of the current design and deployment of the GPON network was made, from which experimental data were collected, such as transmission power, the operating wavelength of the transmitter (OLT) located in Arcopata; the elements that make up the optical distribution network (ODN), the approximate interconnection distance to the terminal boxes and users, as well as the reception power levels. Based on this data, a simulation was carried out for the most distant user. Subsequently, simulations of XGS-PON and NG-PON2 technologies were conducted under the same ODN conditions for the most distant user, but taking into account the technical specifications of these technologies, such as transmission and reception parameters. Then, with the data obtained from the Optisystem simulation software, a comparative analysis of the performance parameters of the mentioned technologies was conducted, concluding that these new technologies offer better performance and scalability for a larger number of users. XGS-PON offers a better balance between cost and performance, making it a better option for users in the study area.

Keywords — FTTH, OLT, ODN, ONU, GPON, XGS-PON, NG-PON2, Q factor, Bit error rate (BER), Eye diagram.

CAPÍTULO I: GENERALIDADES

1.1. Introducción

El presente trabajo de investigación, tiene como finalidad evaluar analíticamente el rendimiento de una red FTTH con tecnología GPON implementada (tecnología que actualmente es utilizada por la mayoría de los operadores y distribuidores de internet) en la zona del Centro Histórico de la Ciudad de Cusco, con las tecnologías PON de nueva generación a través de una simulación, para constatar el desempeño de estas tecnologías. Esto debido a la creciente demanda en el ancho de banda y una mejor calidad de servicio para diferentes aplicaciones como son la transferencia de grandes cantidades de información, videoconferencias, servicios de streaming, videojuegos, etc.

Es por ello que se tomó la información necesaria de estas tecnologías en base a sus recomendaciones, especificaciones técnicas, diferencias tecnológicas, ventajas y desventajas, así como el aspecto económico para determinar cuál es la mejor opción, ya que gran parte de las investigaciones y aplicaciones actuales a nivel local y nacional con respecto a redes de fibra, se basan en diseño, análisis y despliegue con tecnología GPON; y existe escasa información e investigaciones con respecto a las tecnologías PON de nueva generación.

Para llevar a cabo este trabajo, se hizo la toma de datos y la descripción de una red GPON desplegada parcialmente en el Centro Histórico de la Ciudad del Cusco perteneciente a la empresa Internet Perú Cable S.A.C, donde el transmisor se encuentra en Arcopata y los usuarios entre las Plazas de San Francisco y la Plaza de Armas, interconectados a través de una red de distribución óptica, que se escogió como referencia para realizar este trabajo, ya que esta red cuenta con usuarios comerciales y empresariales que se dedican a diferentes servicios como hotelería, agencias de turismo, entidades bancarias, entre otros, que requieren tasas de datos superiores a las tecnologías utilizadas actualmente, y que seguirán en aumento. Lo que conllevaría a mejorar la infraestructura de red de esta empresa y otras, migrando con las nuevas tecnologías PON de nueva generación reutilizando el máximo de la red de distribución óptica.

Posteriormente con los datos obtenidos de la red GPON, se realizó la simulación de esta tecnología, seguidamente de las redes XGS-PON y NG-PON2 con los mismos datos de la red de distribución óptica, considerando el usuario más lejano, para obtener los resultados de los parámetros de rendimiento de estas tecnologías a través del software Optisystem y analizar las diferencias de acuerdo con estos resultados, que llevaron a sacar las conclusiones y recomendaciones de esta investigación.

1.2. Planteamiento del problema

Los nuevos servicios de internet necesitan de redes de telecomunicaciones más avanzadas que las ya existentes, por lo que la necesidad de conectividad después del brote del COVID-19 a nivel mundial nunca ha sido tan importante, como enviar y recibir una gran cantidad de correos y archivos; videoconferencias y de actividades recreativas, donde los servicios de streaming vienen siendo la alternativa número uno para las personas.

Frente a esta situación, las redes de fibra óptica vienen demostrando ser una mejor alternativa para transmitir datos de alta velocidad, puesto que el acceso a Internet que utilizamos, opera por la instalación de este medio físico en los fondos marinos, conformando el 95 % de todos los medios de transmisión cableado a nivel mundial [1].

En el Perú, se calculó que terminando el año 2023, las redes de fibra óptica se posicionaron como el medio de mayor uso, representando un total del 56.92 % para los servicios de internet fijo, logrando un récord histórico de 2 015 195 conexiones usando esta tecnología. Evidenciando un crecimiento del 64.52 % de conexiones con respecto al 2022 con redes fibra óptica y verificando una tasa de crecimiento anual del 85.97 %, según un informe del Organismo Supervisor de Inversión Privada en Telecomunicaciones (OSIPTEL) [2]. En la Fig. 1, se puede observar la evolución de conexiones de fibra óptica y la participación según la tecnología de acceso a internet fijo.

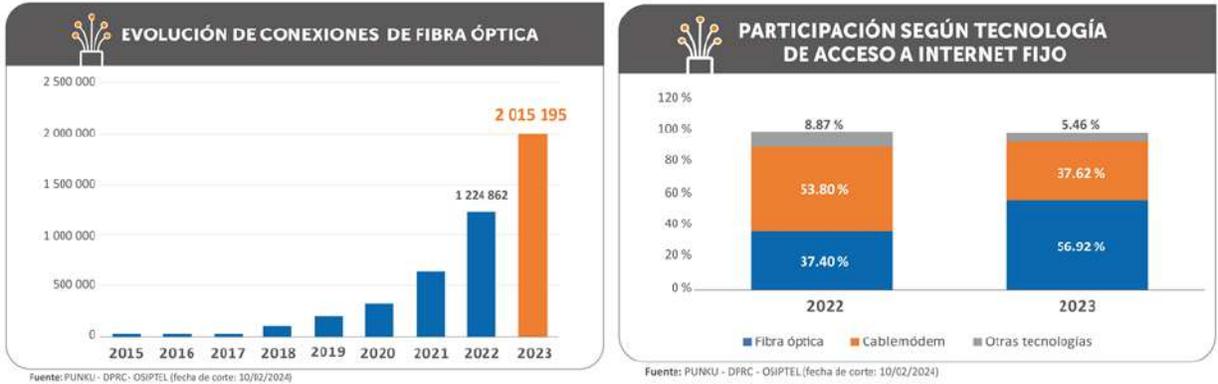


Fig. 1. Evolución de conexiones de fibra y participación según tecnología de acceso hasta el 2023 [2]

Por otra parte, la tecnología xDSL y la tecnología inalámbrica Wimax, cuentan con una participación del 5.46 %, según el reporte hasta el 2023 y continúan disminuyendo, por lo que se estima que para fines del 2024 su aportación será casi nula [2].

Actualmente en la ciudad del Cusco y a nivel nacional, una gran parte de proveedores de servicio de internet usan redes HFC y FTTH basada en tecnología GPON, tanto en zonas residenciales y empresariales, pero en los próximos años será necesario la implementación de tecnologías que ofrezcan mayores tasas de transmisión y por ende una mejor calidad de servicio. En la Fig. 2, se observa las conexiones por fibra óptica hasta el 2023 en cada región:



Fig. 2. Conexiones de fibra óptica en regiones el 2023 [3]

Sobre el despliegue de las redes FTTH, los sistemas o tecnologías utilizadas son las conocidas como las Redes Ópticas Pasivas (PON) con la capacidad de distribuir voz, video y datos; con transmisiones de largo alcance, implementación simple y cables de menor peso que ocupan un espacio más reducido entre conductos y carriles, en comparación con los cables de cobre. Dentro de las PON existen estándares como APON, BPON y EPON; y recientemente la más utilizada es GPON (Gigabit Passive Optical Network).

La tecnología GPON fue estandarizada el año 2004 según las recomendaciones ITU-T G.984, con sistemas comerciales desde el 2006 a nivel mundial; y en la actualidad está siendo elegida para ofrecer una mayor tasa de datos con respecto a las tecnologías anteriormente usadas como xDSL o HFC (Red híbrida de fibra y coaxial), tanto en clientes residenciales y empresariales, sin embargo, no está cumpliendo las expectativas de muchos países, debido al aumento en la demanda de servicios de internet y la crisis económica después de la pandemia.

Existen propuestas en el mejoramiento de las tecnologías PON, que son conocidas como las Redes ópticas pasivas de nueva generación o por sus siglas en inglés NG-PON (New Generation PON), que tienen objetivo incrementar el ancho de banda y los alcances que tienen las tecnologías PON de la actualidad, reutilizando el máximo de la red óptica física desde la central hasta los abonados, pero los estudios existentes sobre redes pasivas en el medio local y nacional, tratan en su mayoría sobre análisis y diseño de redes FTTH basadas en tecnología GPON, dependiendo de cada zona de estudio, en cuanto a la demanda, accesibilidad y disponibilidad; para implementar una nueva red o sobre ya instaladas.

Una de las tecnologías recientes es XGS-PON (10 Gigabit Symmetrical Passive Optical Network), que fue estandarizada el 2016 según la ITU-T G.9807 para las tecnologías de transmisión basadas en fibra de red óptica pasiva (PON). Esta tecnología admite tasas de datos de hasta 10 gigabits por segundo (Gbps) simétricos por puerto, lo que significa que esta nueva tecnología tiene la capacidad de brindar acceso a la red de banda ancha de hasta 10 Gbps de flujo descendente y 10 Gbps de flujo ascendente.

Otra de estas tecnologías es la NG-PON2 (también conocido como TWDM-PON), o Red óptica pasiva de próxima generación 2, que fue estandarizada con ITU-T G.989 en el 2015 y propone una arquitectura con una capacidad de rendimiento total de la red de hasta 40 Gbit/s por puerto, correspondiente a 10 Gbit/s de velocidades simétricas de subida/bajada disponibles en cada suscriptor [4].

Se hizo una revisión de los repositorios de las universidades a nivel nacional y existe nulos o escasos estudios e investigaciones relacionadas con las tecnologías PON de nueva generación, como el trabajo de tesis de Ítalo Gregorio Hurtado Páñez, que desarrolla una red GPON en Yanahuanca en la ciudad de Pasco, donde en la parte final de los resultados de esta tesis, se realiza una comparación con las tecnologías EPON, GPON y XG-PON en cuanto a sus características técnicas y económicas, llegando a la conclusión que la tecnología GPON es la más factible para esta zona por la demanda de ancho de banda y optimización de recursos [5].

1.1.1. Problema general

La zona del Centro Histórico de la Ciudad de Cusco enfrenta un déficit de capacidad de ancho de banda debido al uso predominante de las tecnologías HFC y GPON, las cuales limitan la demanda actual y futura de servicios de alta velocidad y baja latencia. Esto afecta tanto la experiencia de los usuarios como la posibilidad de brindar servicios de calidad, requiriendo así la implementación de tecnologías más avanzadas como las PON de nueva generación, que puedan responder a las exigencias de la demanda; lo que conlleva a realizar una investigación en cuanto al rendimiento, ventajas y desventajas de estas tecnologías, para el mejor desempeño de la red en la zona de estudio. Así mismo, poner en contexto la información de estas nuevas tecnologías para profesionales que se dedican al rubro de las telecomunicaciones y proveedores de servicio de internet que están haciendo uso de las redes FTTH, debido a que existe escasa información sobre estas tecnologías en el medio local y nacional.

Por tal motivo, el trabajo de investigación a desarrollar es el “ANÁLISIS COMPARATIVO DEL RENDIMIENTO DE UNA RED GPON IMPLEMENTADA EN EL CENTRO HISTÓRICO DE LA CIUDAD DE CUSCO CON REDES XGS-PON Y NG-PON2”.

1.2.1. Problemas específicos

- Actualmente los distribuidores de internet a nivel regional y nacional realizan implementaciones en redes híbridas de coaxial y fibra, conocidas como HFC, que están dejando de ser utilizadas y no presenta actualizaciones o mejoras para su despliegue; y redes de pura fibra FTTH, siendo GPON la tecnología más utilizada en estas redes en los últimos años.
- En la actualidad un reto de las telecomunicaciones específicamente en las redes FTTH, es el aumento en la demanda del ancho de banda, menor latencia y mayor cobertura; lo que conlleva a un mejor rendimiento y mejor calidad de servicio en abonados residenciales y empresariales.
- La tecnología GPON a pesar de ser la más utilizada en una red FTTH, tiene un costo mayor en despliegue, equipos terminales, equipos de mantenimiento y medición en comparación con las redes HFC actuales; por lo que algunos proveedores siguen haciendo uso de esta última según la zona.
- A pesar de que GPON ya es utilizado por varios proveedores, la demanda en el ancho de banda sigue en aumento para servicios de telecomunicaciones, sobre todo en el sector empresarial.
- Las redes actuales GPON no pueden superar los 2.5 Gbps en descarga, lo que sí se lograría con las tecnologías PON de nueva generación.

1.3. Justificación

La ciudad del Cusco, al ser uno de los principales destinos turísticos a nivel nacional, cuenta con diversos servicios en los que destacan hoteles, centros de recreación, agencias de turismo y entidades bancarias; por ello es de necesidad que la ciudad cuente con una infraestructura tecnológica que de soporte a una red de datos. Tal es así que la mayoría de los operadores en la ciudad, tienen su propia red de fibra óptica desplegada e implementada, para brindar un acceso adecuado a estos servicios, donde gran parte de los operadores usan redes HFC o FTTH para llevar los datos a sus distintos usuarios, siendo la más actual las redes FTTH sobre GPON. Aun así, se prevé que la capacidad requerida por los usuarios seguirá creciendo y por lo tanto se requiere mejorar la tecnología de acceso para brindar un mejor servicio, por lo que este trabajo de investigación busca analizar el rendimiento de una red desplegada con tecnología GPON y realizar

una comparación mediante una evaluación de parámetros para la mejora de esta infraestructura usando las tecnologías PON de nueva generación como XGS-PON y NG-PON2.

Para realizar este análisis comparativo, la zona de estudio es una red que abarca las plazas principales del Centro Histórico de la Ciudad de Cusco, interconectada a través de una red de fibra óptica, con un nodo transmisor que está ubicado en Arcopata, perteneciente a un distribuidor de servicios de internet, donde se tomará los datos y se simulará dicha red FTTH. Esta red se encuentra conformada por un transmisor o red de terminal óptica (OLT) que envía datos hasta los receptores ópticos o unidades ópticas (Optical Network Unity, ONU) de cada usuario, conectada mediante una red de distribución óptica (Optical Distribution Network, ODN) a ciertas distancias. Se realizará una simulación de las tecnologías propuestas donde primeramente se simulará la red GPON, después se simulará la red con tecnología XGS-PON y por último la red con tecnología NG-PON2.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Analizar comparativamente una red FTTH basada en tecnología GPON diseñada e implementada en la zona del Centro Histórico de la Ciudad de Cusco, con las tecnologías PON de nueva generación XGS-PON y NG-PON2 mediante una simulación, para la evaluación de acuerdo con sus principales parámetros de rendimiento.

1.4.2. Objetivos específicos

- Estudiar las diferencias tecnológicas, ventajas y desventajas entre las tecnologías GPON, XGS-PON y NG-PON2.
- Evaluar experimentalmente la red GPON implementada en la zona de estudio y llevarla a una simulación para analizar sus principales parámetros de rendimiento.
- Simular una red XGS-PON para la zona de estudio y analizar sus principales parámetros de rendimiento.

- Simular una red NG-PON2 para la zona de estudio y analizar sus principales parámetros de rendimiento.

1.5. Alcances

- Se realizará una descripción de una red FTTH instalada parcialmente con tecnología GPON en la zona de estudio, como los equipos terminales y la red de distribución óptica (ODN); realizando mediciones como la potencia de transmisión, recepción y longitud de onda de operación de dicha red.
- Se realizará la simulación de tecnologías PON, en base a las características técnicas del medio físico establecido por la ODN de la red actual, así como las características de la línea de distribución óptica (OLT) y la unidad de red óptica (ONU), propias de cada tecnología, para la evaluación de sus parámetros.
- Se establecerá un estudio comparativo de estas tecnologías en una zona de estudio, y que profesionales en telecomunicaciones e interesados a fines de la escuela profesional de Ingeniería Electrónica, tomen este estudio como referencia para el conocimiento en tecnologías PON de nueva generación.
- Los resultados podrán ser analizados e interpretados por profesionales en telecomunicaciones; y así, se siga realizando estudios e investigaciones con respecto a las nuevas tecnologías PON.

1.6. Limitaciones

- No se cuenta con los equipos de propósito específico, que permitan obtener una medición de los parámetros de rendimiento de la red GPON implementada para realizar una evaluación, ya que los equipos necesarios para realizar estas mediciones tienen un costo elevado.
- Los parámetros de rendimiento evaluados para el análisis comparativo de las tecnologías mencionadas se obtendrán por medio de un software de simulación, por lo que estarán limitados por la capacidad de procesamiento y las herramientas que nos pueda brindar.
- La simulación para este análisis se realizará en una transmisión de sentido descendente.

1.7. Metodología

La investigación es de tipo experimental descriptivo de enfoque cuantitativo, ya que se evaluará el rendimiento de tecnologías de telecomunicación basadas en fibra óptica en una zona determinada, mediante una descripción y recolección de datos de una red FTTH parcialmente implementada con tecnología GPON, para llevarlos a un software de simulación y obtener así sus parámetros de rendimiento. Posteriormente se simulará las tecnologías XGS-PON y NG-PON2 con los mismos datos obtenidos de la ODN de la red a través del mismo software; para que luego, con los datos obtenidos del software de simulación, se realice una evaluación comparativa del rendimiento de estas nuevas tecnologías con respecto a GPON.

1.8. Variables

1.8.1. Variables independientes

- Pt: Potencia de transmisión
- λ : Longitud de onda de transmisión en sentido descendente
- Tasa de transmisión

1.8.2. Variables dependientes

- Factor Q
- Tasa de error de bit (BER)

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

Revisando los repositorios digitales de diferentes universidades del Perú, de trabajos de tesis e investigaciones recientes con respecto a las redes FTTH, la gran mayoría es en base a tecnología GPON, tal es el caso del trabajo de tesis de Ítalo Gregorio Hurtado Páñez [5], que desarrolla el diseño de una red GPON para la localidad de Yanahuanca en el departamento de Pasco, para el diseño, disponibilidad, presupuesto de potencia, tasa de transmisión, alcance y escalabilidad de red como una opción para brindar un mayor ancho de banda a los usuarios de esta zona, donde en la parte final de esta investigación, se realizó una comparación de las tecnologías EPON, GPON y XG-PON en cuanto a las características técnicas y económicas; y se concluye como mejor alternativa económica el uso de la tecnología GPON por tasa de transmisión, demanda del ancho de banda, optimización de recursos.

Con respecto a las tecnologías PON de nueva generación, a nivel mundial existen estudios recientes, como el trabajo de tesis de Roberth Alexis López Alban [6], que desarrolla el estudio y diseño de una red de NG-PON2 en el barrio de Juan de Velasco en Ecuador, con la finalidad de comprender su estructura y funcionamiento, realizando una simulación de esta red mediante Optisystem para evaluar el rendimiento, considerando sus parámetros de transmisión. Finalmente hace una mención de la tecnología XGS-PON con respecto a sus especificaciones técnicas, pero no realiza una comparación de ambas en cuanto al rendimiento.

En un artículo presentado por Stefani Dian Hutami y Teguh Imam Santoso [7], se realizó una comparación del rendimiento de las tecnologías GPON y XGS-PON mediante una simulación y evaluación en sentido descendente. La simulación de ambas se realizó bajo ciertas condiciones como la misma potencia de transmisión de la OLT, presupuesto de potencia de la ODN y parámetros de recepción; con la diferencia de la longitud de onda de transmisión y la tasa de transmisión respectiva de cada tecnología. Los resultados obtenidos, no presentaron una mejora de XGS-PON con respecto a GPON, en cuanto al rendimiento como el factor Q y el BER, debido a

que no se consideraron los parámetros que deben cumplir el receptor óptico de una ONU XGS-PON.

Otros trabajos de investigación son los presentados por investigadores como el artículo de K.A. Mat Sharif, N.A Ngah, A. Ahmad, K. Khairi, Z.A. Manaf, D. Tarsono [8], donde se analizó una demostración de una red GPON y XGS-PON coexistiendo en la misma distribución de red óptica. El funcionamiento y el rendimiento de ambos sistemas se demostró mediante el uso de dos OLTs (GPON y XGS-PON) y cinco unidades de red óptica (ONU) XGS-PON y dos GPON compartiendo la misma red de distribución de fibra. El presupuesto o pérdida de potencia, las longitudes de onda operativas y la medición de rendimiento de ambos sistemas fueron los parámetros discutidos en este artículo. Los resultados mostraron un funcionamiento y rendimiento exitoso en XGS PON y GPON en un mismo entorno.

Por otra parte, en el artículo desarrollado por Muhammad Irfan Anis¹, Muhammad Shahbaz Qureshi¹ y Saad Zafar [9], que propusieron una opción de compatibilidad entre TWDM-PON (que también es otro nombre para NG-PON2), con una red GPON y video, utilizando codificación RZ y NRZ. Se demostró la superposición de video, donde las dos versiones de PON coexisten sobre la misma infraestructura según las especificaciones de NG-PON2, para investigar su viabilidad y rentabilidad. El sistema propuesto, logró un enfoque capaz de proporcionar funciones de compatibilidad, y se demostró una solución a futuro en la demanda de ancho de banda que permita a los proveedores de servicios de telecomunicaciones, una planificación eficiente de la red y flexibilidad de expansión. El análisis de rendimiento y la comparación se realizó sobre la base del diagrama de ojo, factor Q, relación señal/ruido y potencia óptica recibida.

2.2. Fibra óptica

Es el material o medio físico que hace posible la transmisión de información a través de haces de luz, caracterizada por ser una guía de onda cilíndrica. Este es el medio de transmisión físico más usado en los sistemas de comunicaciones y redes ópticas. Entre sus ventajas resalta la alta capacidad de transmisión, mínima atenuación, inmunidad a interferencias electromagnéticas; cables livianos, flexibles y de mayor subsistencia a los cables conductores.

La fibra óptica está compuesta por un núcleo, recubierto por una capa de mayor índice de refracción, que permite la reflexión total interna, esta diferencia en los índices de refracción hace que la luz se refleje a lo largo del eje de esta según las leyes de Snell. También está compuesta por varias capas protectoras que incluyen una capa de protección y una capa de refuerzo. Esta estructura permite la transmisión eficiente de señales ópticas a través de largas distancias con mínima pérdida de señal [10].

Dependiendo de las dimensiones del núcleo, la diferencia de índices, la longitud de onda de transmisión, uno o varios modos se pueden propagar por la fibra. En el caso concreto de las fibras monomodo, se fabrican con núcleos de diámetro pequeño con respecto a la longitud de onda que se desea transmitir [10]. En la Tabla 1 se observa el rango de longitudes de onda:

Tabla 1. Longitudes de Onda más usadas en función del tipo de fibra

	Fibra óptica plástica	Fibra óptica de índice gradual	Fibra óptica monomodo
Rango de longitud de onda de operación (nm)	650 - 850	850 - 1250	1250 - 1625

Nota: [10]

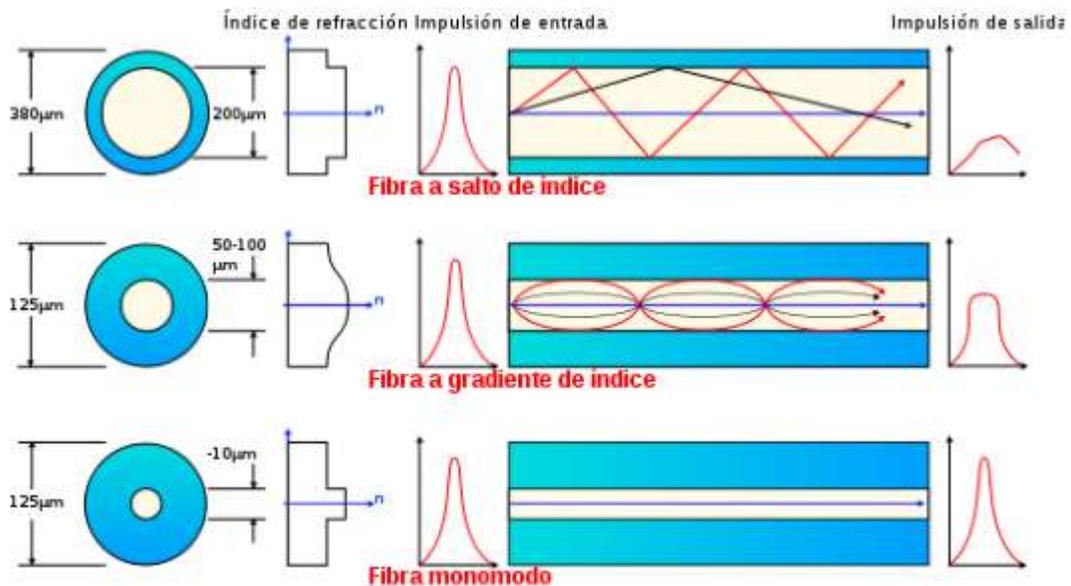


Fig. 3. Tipos de fibra según el diámetro del núcleo [10]

Debido a las características de este material y el medio, existen efectos que llegan a perjudicar la transmisión. Los más relevantes son:

2.2.1. Atenuación

En el contexto de las comunicaciones sobre fibra óptica, la atenuación representa la pérdida de potencia de la señal óptica a lo largo de su trayecto. Este se produce por las características físicas del material que la constituye, perjudicando la transmisión a largas distancias, para esto se escogen intervalos de longitudes de onda de acuerdo al efecto que producen, debido a que en estos intervalos la luz tiene un comportamiento distinto [10]. La ecuación para calcular la atenuación en decibelios es la siguiente:

$$A (dB) = 10 \log \left(\frac{P_{ent}}{P_{sal}} \right) \quad (2.1)$$

Donde:

A : Atenuación (dB)

P_{ent} : Potencia de entrada (W)

P_{sal} : Potencia de salida (W)

Para calcular la atenuación total en un enlace de fibra óptica, que también representa la pérdida óptica en un sistema óptico, se tiene lo siguiente:

$$A_{total} = aL + bN_1 + cN_2 + dN_3 \quad (2.2)$$

Donde:

aL : Atenuación (a : atenuación por longitud de onda (dBm/km), L : longitud del cable (km))

bN_1 : pérdida por empalme (b : pérdida de empalme, N_1 : número de empalmes)

cN_2 : pérdida por conector (c : atenuación del conector frío, N_2 : número de conectores fríos)

dN_3 : pérdida por splitter (d : pérdida por splitter, N_3 : número de splitters)

2.2.2. Dispersión

Este efecto se produce cuando las componentes de la señal de transmisión toman diferentes rutas del medio, generando un retardo de propagación distinta entre el transmisor y receptor, este efecto se acumula en la fibra, por lo que en el receptor se obtiene una señal ensanchada en comparación a la transmisión, produciéndose la ISI (Interferencia Inter Símbolo) [10]. Existen 3 tipos de dispersión, que se mide en unidades de tiempo, típicamente en nanosegundos (ns) o picosegundos (ps), relacionadas por la siguiente ecuación, para calcular la dispersión total:

$$\Delta t_{total} = \sqrt{(\Delta t_{modal})^2 + (\Delta t_{cromática})^2 + (\Delta t_{PMD})^2} \quad (2.3)$$

- **Dispersión modal:** Ocurre en fibras ópticas multimodo, donde diferentes modos (trayectorias de luz) viajan a diferentes velocidades a lo largo de la fibra. Esto provoca que los pulsos de luz se ensanchen y se superpongan al llegar al receptor, limitando la capacidad de transmisión a distancias largas. Este tipo de dispersión no se manifiesta en fibras monomodo, por lo que su valor es 0 [11].
- **Dispersión cromática:** Ocurre en fibras monomodo y multimodo, debido a la variación del índice de refracción de la fibra a diferentes longitudes de onda. Para calcular la dispersión cromática, se tiene la siguiente ecuación:

$$\Delta t_{crom} = D \cdot \Delta\lambda \cdot L \quad (2.4)$$

Donde:

Δt_{crom} : Ensanchamiento temporal cromático (ps)

D : Coeficiente de dispersión cromática de la fibra (ps/nm/km)

$\Delta\lambda$: Ancho espectral de la fuente (nm)

L : Longitud de la fibra (km)

- **Dispersión por modo de polarización (PMD):** Afecta principalmente a fibras monomodo y se debe a ligeras asimetrías en la fibra causando que diferentes polarizaciones de la luz viajen a diferentes velocidades [11].

$$\Delta t_{PMD} = D_{PMD} \sqrt{L} \quad (2.5)$$

Donde:

Δt_{PMD} : Ensanchamiento temporal por dispersión por modo de polarización (ps)

D : Coeficiente de dispersión por modo de polarización (ps/ \sqrt{km})

L : Longitud de la fibra óptica (km)

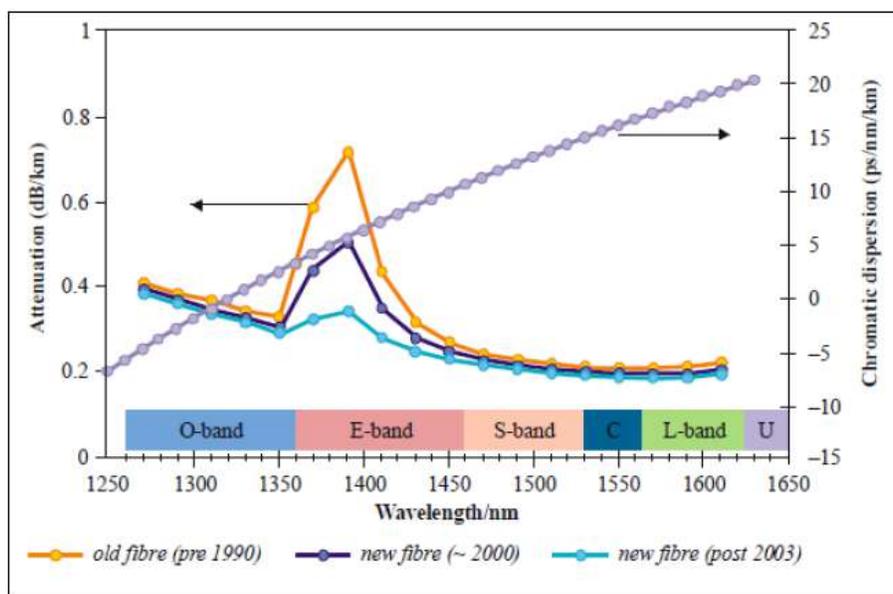


Fig. 4. Atenuación y dispersión en la fibra óptica monomodo [6]

2.3. Transmisores y Receptores ópticos

En las comunicaciones digitales ópticas, las señales son transmitidas por pulsos de luz generados mediante una codificación, como son las modulaciones OOK (On-Off Shift Keying) o principalmente las que se generan símbolos de pulso estrecho como la codificación NRZ (sin retorno al cero). Para generar la señal óptica, se hace uso de un láser que proporciona luz constante, que será modulado por la señal eléctrica NRZ a través de un modulador, para variar la intensidad de la luz, que será enviado por la fibra óptica, y finalmente convertir la señal óptica a los datos digitales, por medio de un receptor óptico al final del enlace.

2.3.1. Codificación NRZ

Es un esquema de codificación utilizado en comunicaciones digitales para representar datos binarios. En NRZ, los niveles de voltaje o intensidad de luz en una señal no regresan a un estado de referencia (cero) entre los bits, lo que significa que el valor de cada bit se mantiene durante todo el período del bit [12].

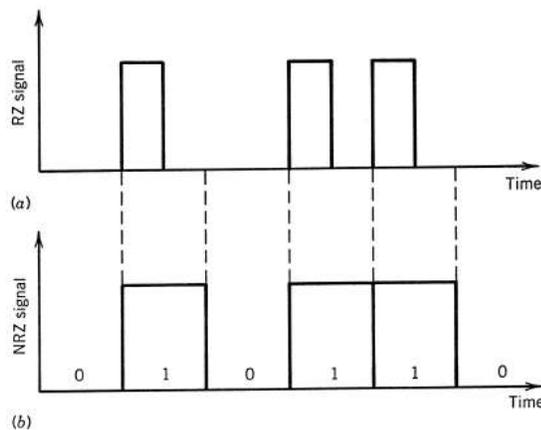


Fig. 5. Codificación RZ y NRZ [12]

2.3.2. Láseres

Los láseres se producen por amplificación de luz a través de la radiación por emisión estimulada, lo que admite producir haces de luz angostos, directivos a varias longitudes de onda determinadas. Según su modo de operación, el más utilizado es el láser de onda continua (CW); y según su estructura es el láser de retroalimentación distribuida (DFB).

- **Láser DFB-CW:** Este tipo de laser combina las dos características importantes. Esta estructura permite que el láser emita en una longitud de onda muy precisa y estable, lo que resulta en un espectro de emisión muy estrecho, operando en modo continuo, emitiendo un haz de luz estable y constante durante su funcionamiento, en lugar de emitir pulsos. Típicamente su ancho de línea ronda entre 1 MHz a 10 MHz, lo que lo hace ideal para aplicaciones como sistemas de comunicación de alta velocidad y sistemas de medición [12].

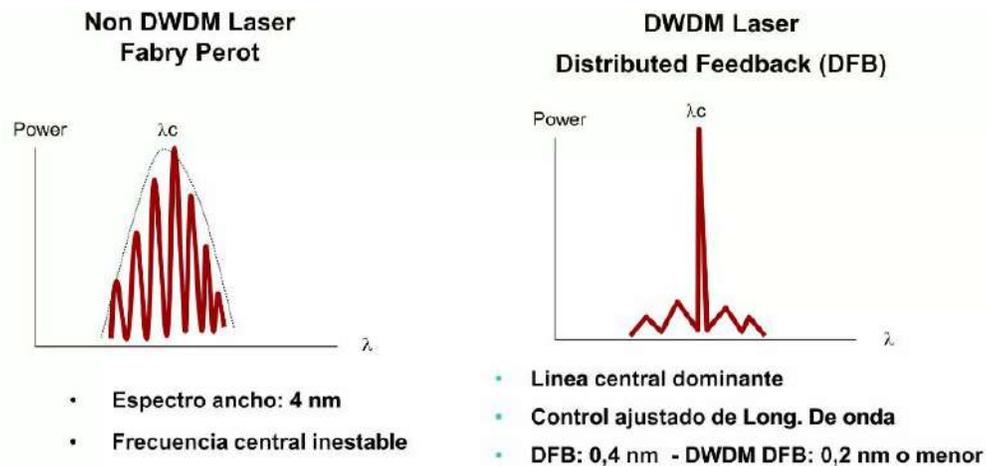


Fig. 6. Características de láseres FP y DFB [13]

2.3.3. Moduladores ópticos

Son dispositivos que controlan ciertas propiedades de una señal de luz para codificar información antes de ser transmitida a través de un sistema de comunicación óptica. Estas propiedades pueden incluir la intensidad, fase, frecuencia o polarización de la luz, esencial para convertir señales eléctricas en señales ópticas que puedan ser transmitidas eficientemente a través de la fibra. Existen dos tipos de modulación, modulación directa (DML) y externa (EML):

- **Modulación directa (DML):** Se realiza directamente sobre el láser modulando su corriente de inyección. Esto limita la velocidad de datos y la distancia de transmisión debido al efecto chirp y dispersión cromática, por lo que su uso no es común en sistemas de altas tasas de datos.
- **Modulación externa (EML):** La luz generada por un láser CW pasa a través de un modulador externo, donde se modula su intensidad, fase, o frecuencia sin afectar la operación de la fuente de luz. Ofrecen mejor control, menor chirp y mayor tasa de datos, pero a un costo y complejidad más elevados. Uno de los más comunes es el modulador Mach-Zehnder (MZM), que utiliza la interferencia óptica para modular la intensidad de la luz.

Una característica inherente del MZM, es la pérdida de 3 dB debido a que la señal óptica se divide en dos ramas, esta división es necesaria para que el modulador funcione, y aunque

las señales se recombinan, no se puede recuperar la pérdida total debido a la interferencia de las señales [14].

Un parámetro crítico en moduladores Mach-Zehnder es la tasa de extinción (ER), que mide la relación entre los niveles de potencia óptica en los estados de "encendido" (on) y "apagado" (off) de la señal modulada. Está definida de la siguiente manera:

$$ER = 10 \log \left(\frac{P_{on}}{P_{off}} \right) \quad (2.6)$$

Donde:

P_{on} : Potencia óptica cuando la señal está modulada en el estado "on".

P_{off} : Potencia óptica cuando la señal está modulada en el estado "off".

2.3.4. Filtros ópticos y fotodetectores

Para obtener una única longitud de onda en el receptor que llega del transmisor, se utilizan filtros ópticos, donde la señal filtrada se convierte de óptica a eléctrica con un fotodetector. Por lo general son sintonizables mediante un sistema de recepción que fija diferentes frecuencias. Se caracterizan por el rango en la sintonización y la velocidad al seleccionar la frecuencia requerida [10].

Los fotodetectores utilizados para sistemas de longitud de onda larga, por lo general, son fabricados de InGaAs (arseniuro de indio y galio), lo que permite receptores más sensibles para sistemas de muy alta velocidad. El tipo de fotodiodo más usado es el de avalancha (APD) polarizados a un alto voltaje para generar una ganancia en el fotodiodo. Estos dispositivos son más caros y complicados de fabricar, pero brindan un mejor rendimiento [15].

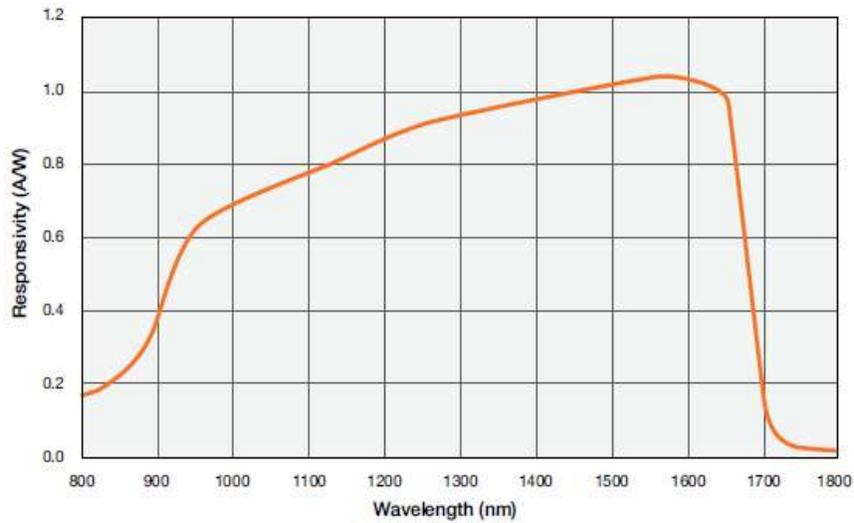


Fig. 7. Capacidad de respuesta vs Longitud de onda de un fotodiodo APD (InGaAs) [16]

La ganancia de un fotodiodo APD está denotada por un factor de multiplicación M , que aumenta al aplicarle una mayor tensión inversa, esto para mejorar la sensibilidad del receptor y ayudar a mantener la calidad de la señal a altas velocidades; sin embargo, al incrementar esta tensión también lo hace el ruido, por lo que el fotodetector debe tener un rango óptimo de ganancia [17].

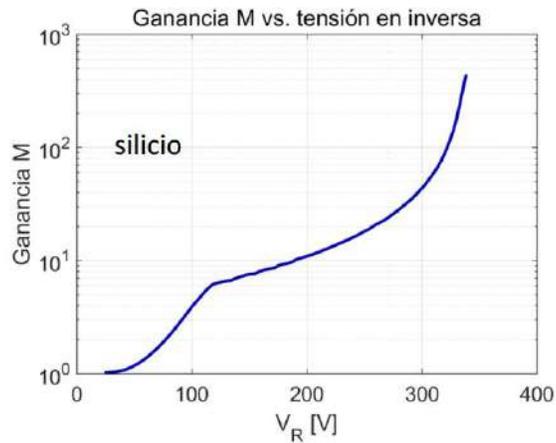


Fig. 8. Curva de ganancia de un fotodiodo de silicio [17]

2.4. Técnicas de multiplexación en la fibra óptica

Para que en una comunicación óptica pueda compartir el mismo medio de transmisión y se lleve la información al receptor, se utiliza las técnicas de multiplexación y las más comunes en las comunicaciones ópticas son:

2.4.1. Multiplexación por división de tiempo (TDM):

Esta técnica fija ranuras o slots de tiempo a las diversas fuentes de tráfico en instantes determinados para empezar la transmisión y así compartir el mismo medio físico evitando el conflicto de datos [10].

2.4.2. Multiplexación por división de longitud de onda (WDM):

Esta técnica permite una mayor flexibilidad y usar de manera más eficiente el espectro de la red. Se usan diferentes longitudes para transmitir datos, donde un multiplexor toma las señales, las combina y la inyecta en la fibra óptica. En la llegada serán divididas mediante un demultiplexor cada longitud de onda correspondiente a cada receptor; con esto se logra que cada longitud de onda no interfiera con las de demás longitudes al transportar la información [12]. Dentro de WDM existen dos tecnologías de multiplexación por división de longitud de onda utilizadas en las telecomunicaciones ópticas para aumentar la capacidad de transmisión de las fibras ópticas, y estas son:

- **Multiplexación por longitud de onda expandida (CWDM):** Técnica de multiplexación óptica que utiliza un espaciado amplio entre las longitudes de onda. Este espaciado más amplio permite el uso de componentes ópticos menos costosos y de menor precisión. El espaciado entre las longitudes de onda en CWDM es típicamente de 20 nm y puede soportar hasta 18 canales en una banda de 1270 nm a 1610 nm [12].
- **Multiplexación por longitud de onda densa (DWDM):** Utiliza un espaciado estrecho entre las longitudes de onda, permitiendo una mayor densidad de canales en la misma fibra óptica. Es más costoso debido al uso de componentes ópticos de alta precisión y la

necesidad de sistemas de amplificación óptica. El espaciado entre longitudes de onda en DWDM es mucho más estrecho, típicamente 0.8 nm o 0.4 nm, lo que permite una mayor densidad de canales y puede soportar un gran número de canales, típicamente entre 40 y 96 canales, y en algunos sistemas modernos, hasta 160 canales en la banda de 1525 nm a 1565 nm (banda C) [12].

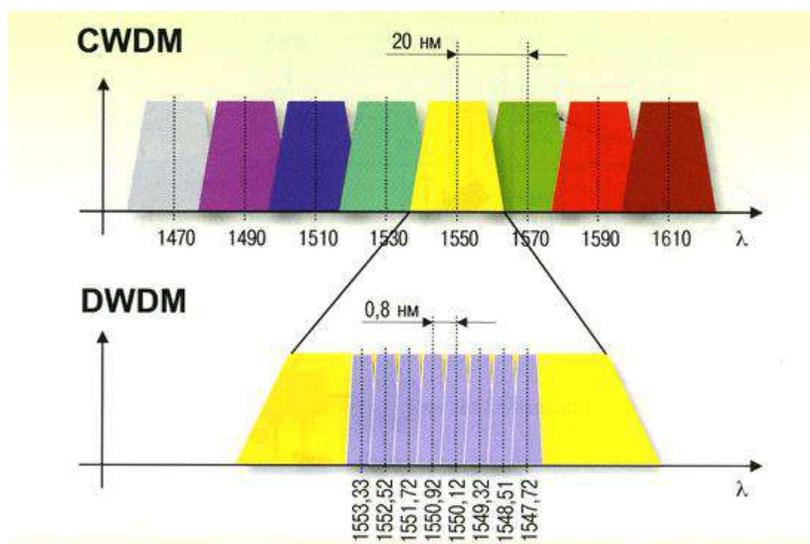


Fig. 9. Multiplexación CWDM y DWDM [18]

2.5. Redes de fibra óptica hasta el hogar (FTTH)

En las redes FTTH (Fibra óptica hasta el hogar), la fibra óptica conforma total o parcialmente el medio de transmisión desde el transmisor hasta los usuarios. Estas redes de fibra ingresaron como una mejor opción de manera parcial para ofrecer a los abonados una mejor calidad de servicio, ya que sus propiedades físicas admiten principalmente una transmisión de alta velocidad, menor atenuación y menor latencia en comparación con las redes de cobre o xSDL o las redes híbridas HFC. Reducen los costos y el tiempo en el despliegue de la red de distribución física, debido a que los componentes ópticos pasivos que la conforman no cuentan con amplificadores u otros componentes activos, que hace que los costos de implementación no sean elevados. Las topologías más utilizadas para el diseño y despliegue en una red son:

- **Topología en estrella:** La interconexión del transmisor en la central es a través de un hilo de fibra exclusiva a cada equipo receptor. Con esta topología se puede controlar y administrar la calidad de servicio; y ofrecer un mayor rendimiento y seguridad. Entre sus desventajas es la dependencia del transmisor central y mayor costo de implementación [19].
- **Topología en árbol:** La interconexión entre el transmisor y los receptores se obtienen usando nodos de difusión y/o elementos de conmutación ópticos pasivos que propagan el tráfico total en el enlace de descarga a todos los usuarios mediante los splitters, que dividen o replican la señal de información. En el enlace de subida, estos mismos elementos combinan el tráfico que viene de los abonados para llevarlo al transmisor [19].

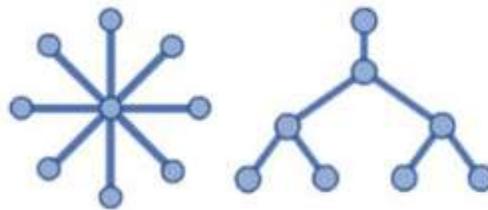


Fig. 10. Topología en estrella y árbol [20]

2.6. Redes ópticas pasivas (PON)

Una red óptica pasiva es una tecnología de última milla que usa topología en árbol o punto multipunto (PtM), debido a que brinda datos de una única fuente hacia múltiples usuarios. Está conformada principalmente por tres componentes entre el transmisor u oficina central del proveedor y los receptores: la terminal de línea óptica (OLT), la red de distribución óptica (ODN) y la unidad o terminal de red óptica (ONT). Existen varios estándares como APON (ATM PON), BPON (Broadband PON), EPON (Ethernet PON) y GPON (Gigabit PON), este último siendo el más utilizado, complementando y reemplazando gradualmente a las redes de cobre xDSL y redes híbridas HFC [21]. Los tres componentes principales de una PON son las siguientes:

2.6.1. Terminal de línea óptica (OLT)

Equipo transmisor de la red que convierten las señales eléctricas a señales de luz y se ubica en la central del proveedor. Se encarga del control y administración de los datos transmitidos en sentido ascendente y descendente por medio de la ODN. Su transmisión es de alta potencia porque el envío de señales ópticas se divide en varios flujos hacia los receptores. Puede alcanzar distancias de transmisión de 20 km como máximo, aunque con las nuevas tecnologías PON, las OLT pueden llegar entre los 40 km a 60 km de transmisión [10].

2.6.2. Red de distribución óptica (ODN)

Es el medio físico de comunicación que interconecta la central con los usuarios. Está conformada principalmente por la fibra y los divisores ópticos o splitters. En la ODN es donde se realiza la interconexión entre la OLT y las ONU generalmente con una topología en árbol. También forman parte de la ODN otros componentes ópticos de acondicionamiento, tales como patchcords, el distribuidor de fibra óptica (ODF), fibra óptica monomodo de exteriores, cajas de empalme, cajas de distribución entre otros [10].

2.6.3. Unidad de red óptica (ONU)

Estos equipos transforman las señales de luz en señal eléctrica. Reciben el tráfico de datos en sentido descendente que llegan de la OLT, escogen los datos que les corresponde y también los envían por la ODN en sentido ascendente [10].

En la Fig. 11, se puede observar un esquema de las componentes de una red óptica pasiva:

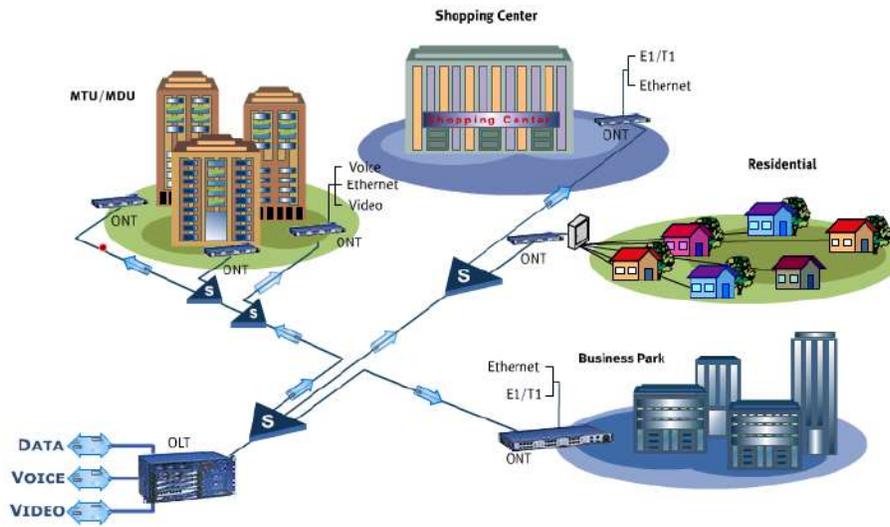


Fig. 11. Red óptica pasiva (PON) [21]

2.6.4. Elementos de interconexión en una red óptica pasiva

Estos elementos son los que permiten la integración de todas las partes de una red PON, que están ubicados entre el transmisor, la red de distribución óptica y los receptores. Estos son los siguientes:

- **Módulo transceptor SFP:** Este módulo es un dispositivo de transmisión y recepción que se conecta a los puertos PON de la OLT. Conecta el circuito eléctrico de la OLT con la red óptica externa. En la Fig. 12 se observa un SFP GPON:



Fig. 12. Módulo SFP GPON [22]

- **Conectores:** Estos dispositivos se colocan en los extremos de los cables de fibra, que permiten la interconexión entre elementos y dispositivos ópticos. Existen diferentes tipos

de conectores y los más utilizados son los SC-APC/UPC donde SC refiere al conector con pulido APC como se observa en la Fig. 13 y sus pérdidas están entre los 0.1 dB y los 0.5 dB [23].

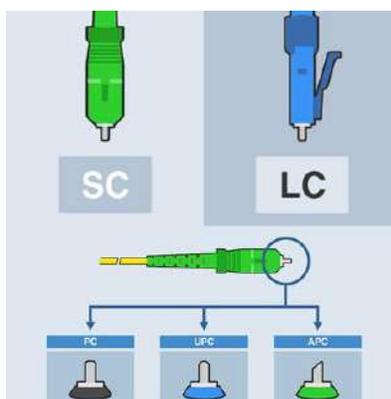


Fig. 13. Tipos de conectores de fibra óptica [23]

- **Patchcords:** Son cables ópticos con una longitud corta entre 1 a 30 metros para interiores, que permiten la conexión de los equipos en la parte del transmisor como la conexión entre los módulos SFP, el distribuidor de fibra óptica (ODF) y los cables ADSS mediante empalmes. Vienen adaptados con conectores entre sus extremos que pueden ser del tipo LC/SC-UPC/APC, SC/SC-UPC, entre otros y sus pérdidas son menores a 0.3 dB [24].

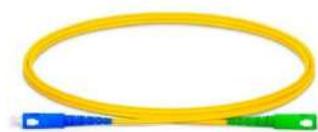


Fig. 14. Patchcord SC/UPC-SC/APC monomodo [24]

- **Distribuidor de fibra óptica (ODF):** Es un dispositivo que gestiona, organiza y protege las conexiones de fibra óptica en una red. Permite dividir señales, conectar y desconectar fibras, y sirve como panel de parcheo para facilitar la interconexión y el mantenimiento de la red.



Fig. 15. Distribuidor de fibra óptica [25]

- **Empalmes:** Para la interconexión de cables de interior con los cables de exterior, generalmente se realizan uniones o empalmes. Existen diferentes tipos de empalmes, entre los que están por:
 - **Fusión:** Comprende a la unión de cables mediante un equipo denominado fusionadora, permite realizar el acople con características adecuadas para la transmisión como una baja atenuación, es el mecanismo más usado para empalmes, las pérdidas están entre los 0.01 a 0.05 dB.
 - **Mecánicos:** Consiste en un elemento que alinea las dos fibras y las une mediante presión, es decir, no se requiere un equipo para realizar este trabajo, pero son menos seguras que los empalmes por fusión, las pérdidas van de 0.2 a 1 dB.

En cuanto a la ODN en el despliegue y la instalación de la red, se deben cumplir con ciertas reglas y normativas de instalación de planta externa, para asegurar una interconexión y calidad de servicio óptima con los usuarios (este aspecto no se mencionará, debido a que esta investigación trata específicamente de una evaluación con los parámetros ópticos de la red). Para ello se hace uso de herrajes, ferretería, cables ópticos aéreos en la planta externa capaces de soportar diversas condiciones medio ambientales externas, así como de elementos de interconexión como divisores de potencia o splitters, mufas, cajas de empalme, cajas terminales, entre otros que se describen a continuación:

- **Fibra óptica monomodo ADSS G.652.D:** Este cable fue diseñado para instalaciones aéreas de planta externa, con la capacidad de soportar condiciones climáticas extremas, líneas eléctricas de alta tensión y fuertes vientos. Se utilizan comúnmente en redes de telecomunicaciones metropolitanas y troncales en redes de distribución que deben instalarse a ciertas alturas, con el fin de reducir el costo de las instalaciones subterráneas. Los cables

de fibra ADSS son adecuados para comunicaciones de larga distancia, transmisión de datos de alta velocidad y servicios de banda ancha de Internet [26].

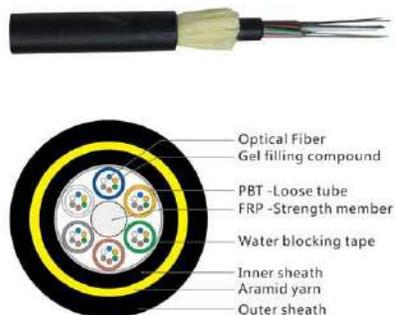


Fig. 16. Fibra óptica monomodo ADSS G.652.D [26]

- **Mufas o cajas de empalme:** Protegen los puntos de fusión de la fibra óptica, su diseño evita el ingreso de humedad y aire al interior de la cavidad contenedora de las fibras. Poseen una mecánica hermética y de gran resistencia a los esfuerzos mecánicos y a condiciones climáticas extremas, y facilitan el acceso para efectos de inspección y ampliación [27].



Fig. 17. Mufa de empalme tipo domo [27]

- **Divisores ópticos o Splitters PLC:** Este dispositivo óptico pasivo se encarga de captar la señal que viene del transmisor para fragmentarla en 2 o más señales idénticas a la salida. Existen splitters de primer nivel preparados para ser fusionados y los de segundo nivel que

cuentan con conectores SC/APC, que suelen colocarse en armarios rack, cajas de empalme y cajas terminales [28].



Fig. 18. Splitter óptico 1x4 SC/APC [28]

- **Cajas de distribución (NAP):** Estas cajas distribuyen el cable de fibra óptica de acometida para la instalación hasta los abonados a través de los splitters de segundo nivel. También se pueden utilizar para alojar empalmes mecánicos y por fusión [29].



Fig. 19. Caja NAP [29]

- **Fibra óptica monomodo ADSS G.657.A:** Esta fibra fue diseñada para ser compatible con el estándar G.652D, con la diferencia de ser menos sensible a torsiones y más resistente a las curvaturas, su aplicación más común es de cable de acometida que van desde las cajas de distribución hasta los usuarios para la interconexión [30].



Fig. 20. Fibra monomodo G.657.A [30]

En los usuarios finales es donde se encuentran los equipos receptores ópticos, junto con otros elementos ópticos de interconexión para recibir la señal de datos. El más usado es el conector rápido, que conecta directamente el cable de acometida a la ONU, lo que proporciona conexiones rápidas y seguras, usualmente son del tipo SC/APC.



Fig. 21. Conector rápido SC/APC [31]

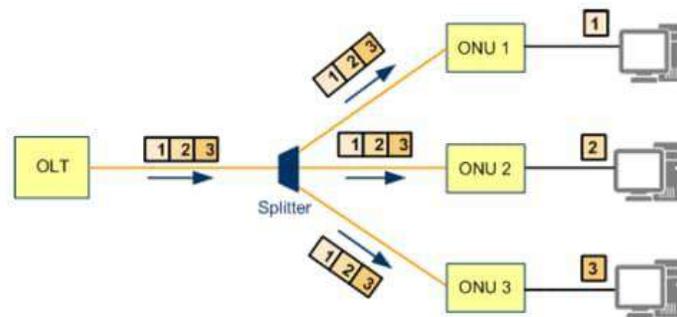
2.7. Tecnología GPON

GPON se desarrolló y estandarizó por la con la recomendación ITU-T G.984.x y puede proporcionar el transporte para de datos y video que utiliza un protocolo de enlace llamado GEM (método de encapsulación GPON) en Ethernet. Sus velocidades de transmisión llegan a 1.25 Gbps de subida y 2.5 Gbps de descarga [32].

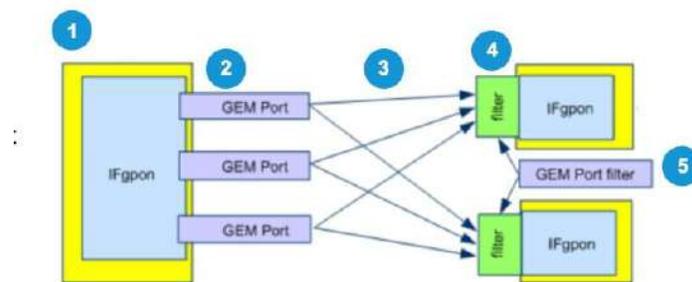
2.7.1. Funcionamiento de una red GPON

El principio de funcionamiento de una red PON es la utilización de multiplexación WDM para lograr comunicaciones bidireccionales sobre una sola fibra. Esta característica viene integrada en los equipos terminales, por lo que están compuestos de filtros ópticos internos, que hacen posible la separación de las longitudes de onda de los canales ascendente y descendente. Por otro lado, para separar las señales de múltiples usuarios en una sola fibra, GPON acude a mecanismos de multiplexación de división de tiempo manejando una comunicación PtM mediante TDM en la transmisión de paquetes de sentido descendente y un modo TDMA en el enlace PtP ascendente [33].

En el sentido descendente, la transferencia de paquetes se reenvía con los mismos datos hacia las ONU, pero con datos identificados ID del puerto GEM (método de encapsulación GPON), lo que permite recibir los datos deseados por esta ID en la ONU. Este funcionamiento es continuo incluso cuando no hay tráfico [34].



(a)



(b)

Fig. 22. (a) Envío de paquetes sentido descendente (b) Proceso de comunicación descendente [34]

1. Las tramas Ethernet son enviadas a los puertos de enlace de procesamiento de servicios de GPON.
2. Este módulo encapsula las tramas Ethernet en los puertos GEM para la transmisión descendente.
3. Las tramas GTC (Convergencia de transmisión GPON) que contienen unidades de datos de la GEM se transmiten a todas las ONU.
4. Los datos se filtran en las ONU de acuerdo a la ID de los puertos GEM contenido en el encabezado de la PDU (Unidad de datos de protocolo) y se queda con los datos significativos para los puertos GEM de la ONU.
5. En las ONU se desencapsula los datos y se envía las tramas Ethernet [34].

Esta trama tiene una duración de 125 μ s y tiene dos componentes que son el control físico descendente (PCBd) y carga útil. El PCBd se transmite a todas ONU y consta del encabezado GTC y BWmap, el primero se usa para delimitar, sincronizar y corregir la trama de errores de envío y el segundo notifica a la ONU de la asignación de ancho de banda ascendente, también especifica los intervalos de tiempo de cada ONU para evitar conflictos con otras [34].

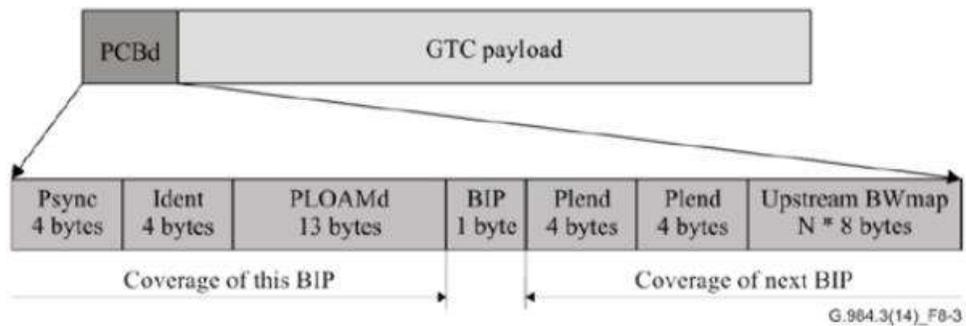
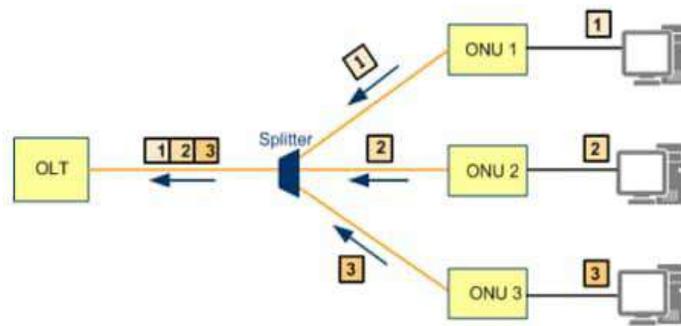
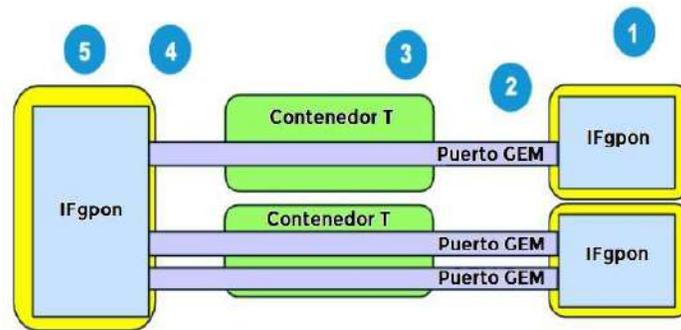


Fig. 23. PCBd y carga útil de GTC [34]

En sentido ascendente se usa TDMA, para ello la OLT asigna ranuras de tiempo en función de la distancia a cada ONU y con ello la asignación de ancho de banda dinámica (DBA), para que se pueda supervisar el tráfico en tiempo real, así como la configuración y el uso.



(a)



(b)

Fig. 24. (a) Envío de paquetes sentido ascendente (b) Proceso de comunicación ascendente [34]

1. Las tramas Ethernet son enviadas por las ONU a los puertos GEM según las reglas configuradas.
2. Las tramas se encapsulan en los PDU GEM y las agregan a las Tcont (contenedor de tráfico) según las reglas que asignan los puertos GEM.
3. Los Tcont usan ranuras de tiempo basadas en DBA y luego transmiten las PDU GEM a la OLT.
4. La OLT desencapsula la PDU GEM para obtener la trama Ethernet.
5. Estas tramas son enviadas por la OLT desde un puerto de enlace ascendente según reglas especificadas.

Cada trama tiene una duración de $125 \mu\text{s}$ que contienen datos transportados por varios Tcont. Las ONU conectadas a un puerto PON comparten el ancho de banda ascendente y cada una envía sus datos en sus propios slots de tiempo según los requisitos del BWmap. La OLT utiliza DBA para la asignación de ranuras de tiempo. Las tramas se envían como ráfagas compuestas por la sobrecarga de la capa física ascendente (PLOu) y uno o más slots de asignación de ancho de banda asociados a un Alloc-ID específico [34].

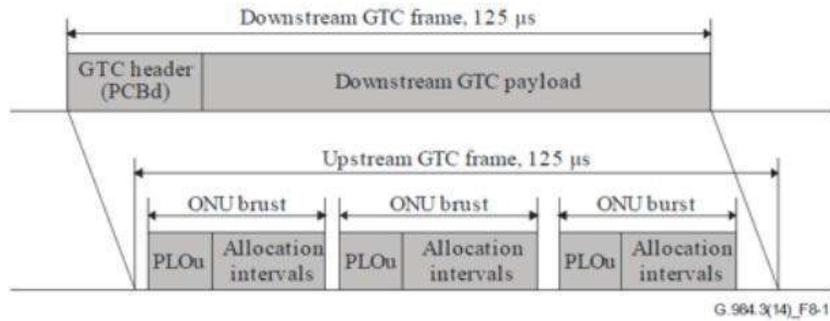


Fig. 25. Trama descendente y ascendente [34]

2.7.2. Arquitectura de red de acceso GPON

En la Fig. 26 según la ITU-T G.984.2, la arquitectura de este estándar adopta una topología PtM, conformada por una red de acceso pasiva que van desde la OLT hasta las ONU [35].

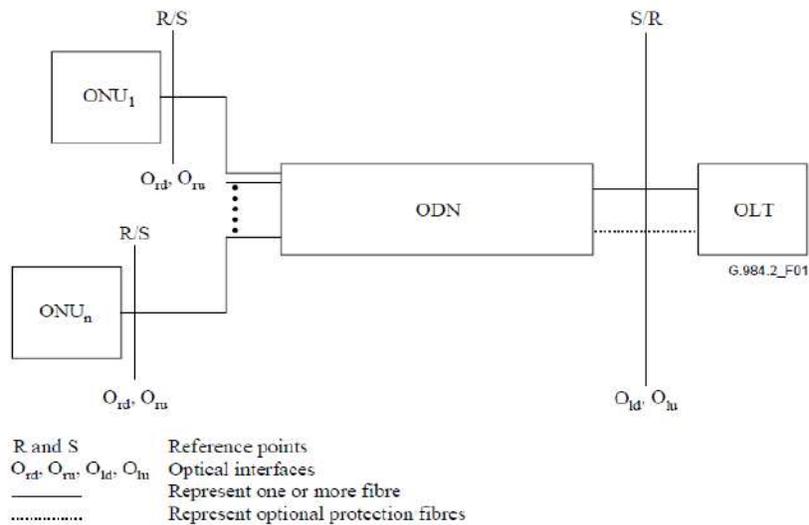


Fig. 26. Arquitectura de red GPON [35]

2.7.3. Especificaciones técnicas

- **Medio físico y método de transmisión:** El medio de transmisión está basado en la fibra monomodo UIT-T G.652, con la subcategoría G.652.D que ofrece mejoras en el rango de

operación de 1260 a 1625 nm, con una baja atenuación y una mejor dispersión, lo que favorece a la evolución de redes. En cuanto al sentido en la transmisión la señal transmitida es en sentido ascendente y descendente a través de la ODN y el método de transmisión usa la multiplexación por división de longitud de onda a través de una fibra para datos, siendo la transmisión bidireccional [35].

- **Código de línea:** En ambos sentidos de transmisión, la codificación utilizada es NRZ (sin retorno a cero) donde el nivel de emisión de luz en alto es para el UNO binario y el nivel de emisión de luz en bajo es para el CERO binario [35].
- **Longitud de onda de operación:** El rango de longitudes de onda de operación en sistemas de una sola fibra es de 1480-1500 nm en sentido descendente y 1260-1360 nm en sistemas de dos fibras ópticas. En sentido ascendente el intervalo de operación es de 1260-1360 nm [35].

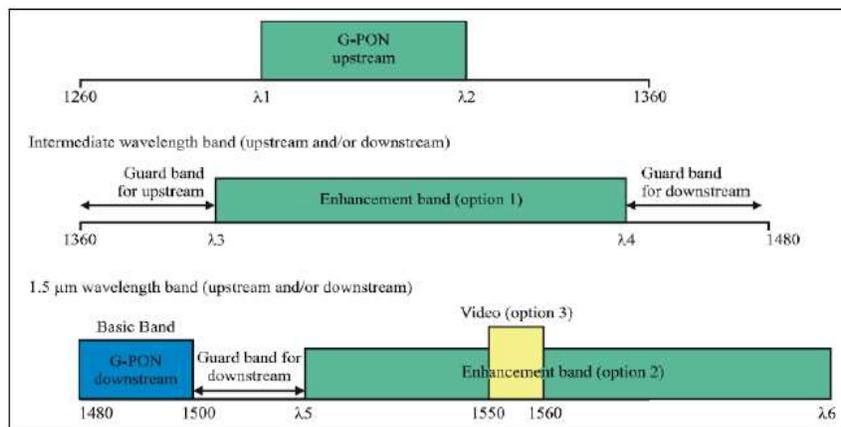


Fig. 27. Asignación de longitudes de onda GPON [35]

- **Alcance físico:** Para una transmisión óptima a las velocidades descritas, se especifica que el alcance debe ser como máximo de 20 Km entre la OLT y la ONT [35].
- **Relación de división:** Por cada interfaz la relación de división es de 1 a 64, lo que quiere decir que por cada puerto físico de la OLT se pueden conectar hasta 64 abonados [35].
- **Pérdida entre la OLT y la ONU:** En una red GPON, existe tres clases de atenuación o pérdida en el trayecto óptico como se muestra en la Tabla 2:

Tabla 2. Clases de pérdida en el trayecto óptico para GPON

Pérdida en el trayecto óptico	Clase A	Clase B	Clase C
Pérdida Mínima (dB)	5	10	15
Pérdida Máxima (dB)	20	25	30

Nota: Clases de pérdida óptica según ITU-T G.984.2. [35]

2.7.4. Parámetros en la interfaz óptica en sentido descendente

Las especificaciones ópticas a una tasa de 2488 Mbit/s se puede observar en la Tabla 3. Según el estándar G.984.2 se consideran diferentes tablas de acuerdo con la tasa de transmisión, pero para esta investigación se está considerando características a 2.5 Gbps, las que serán consideradas para la simulación, así como la potencia de transmisión en la OLT, codificación sin retorno a cero NRZ, longitudes de onda de operación, entre otras:

Tabla 3. Parámetros de la interfaz óptica en sentido descendente para GPON

Elementos	Unidad	Valor		
Transmisor OLT				
Tasa de línea nominal	Mbit/s	2488.32		
Longitud de onda de operación	nm	1480-1500		
Código de línea	-	NRZ pseudoaleatorio		
Máxima reflectancia del equipo a S/R, medida en la longitud de onda del transmisor	dB	NA		
Mínimo ORL de ODN en O y O (Notas 2 y 3)	dB	Mayor que 32		
Clases de ODN		A	B	C
Potencia media lanzada mínima	dBm	0	+5	+3
Potencia media lanzada máxima	dBm	+4	+9	+7
Potencia óptica lanzada sin entrada al transmisor	dBm	NA		
Tasa mínima de extinción	dB	Mayor que 8.2		
Tolerancia del transmisor a la potencia óptica reflejada	dB	Mayor que -15		
Si el láser es MLM- Máxima anchura eficaz	nm	NA		
Si el láser es MLM- Máxima anchura eficaz	nm	1		
Relación mínima de supresión de modo lateral	dB	30		
Receptor ONU				
Máxima reflectancia del equipo R/S, medida en la longitud de onda del receptor	dB	Menor que -20		
Nivel de referencia de tasa de error de bit	-	Menor que 10^{-10}		
Clases de ODN		A	B	C
Sensibilidad mínima	dBm	-21	-21	-28
Sobrecarga mínima	dBm	-1	-1	-8
Inmunidad a dígitos consecutivos idénticos	bit	Mayor que 72		
Tolerancia del receptor a la potencia óptica reflejada	dB	Menor que 10		

Nota: Parámetros de sentido descendente según ITU-T G.984.2. [35]

2.8. Tecnología XGS-PON

Es un estándar actualizado para las tecnologías PON, con una tasa de datos simétrica de hasta 10 Gbps a mayor velocidad. La "X" en XGS representa el número 10, y la letra "S" significa simétrica, por lo que XGS-PON significa 10 Gigabit Symmetrical PON. Este estándar se lanzó en 2016 y se designó como recomendación ITU-T G.9807 [36].

Los principios de funcionamiento lógico del estándar XGS-PON son los mismos utilizados en GPON, estableciendo una comunicación PtM a través de TDM en el sentido descendente y una comunicación PtP mediante TDMA, pero brindando un ancho de banda superior, presentando diferencias en las longitudes de onda de operación, presupuesto de potencia óptico, entre otros, propias de los equipos activos y terminales de XGS-PON como la OLT y ONT.

2.8.1. Arquitectura de red de acceso XGS-PON

La arquitectura de la red de acceso al igual que en GPON, puede tomar topologías PtP y PtM, por lo que la arquitectura de red de estas tecnologías coincide, como en la Fig. 2.20. Sin embargo, XGS-PON debe incrementar las capacidades de GPON en cuanto al ancho de banda, el alcance físico y número de usuarios, por lo que XGS-PON, presenta una arquitectura de referencia, contribuyendo con mayor nivel de detalle en la ODN, que puede consistir en un único segmento de distribución óptico pasivo (ODS), o estar formada por un grupo de ODS pasivos interconectados mediante extensores de alcance (RE) [36], como se observa en la Fig. 28:

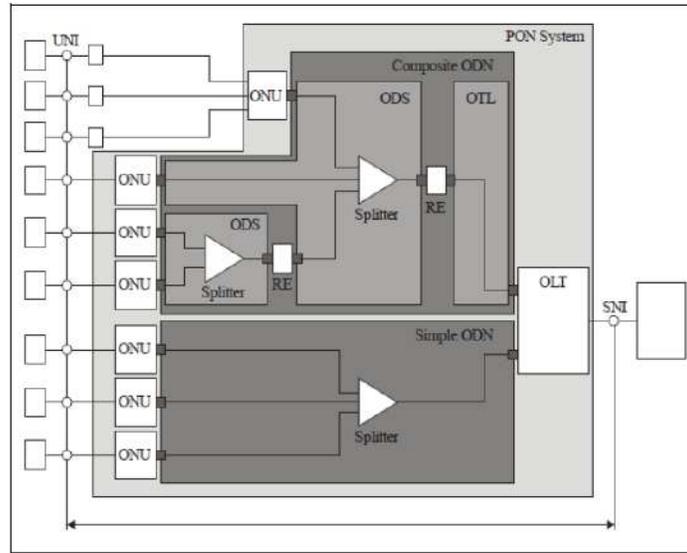


Fig. 28. Arquitectura de red XGS-PON [36]

2.8.2. Especificaciones técnicas

- **Medio físico y método de transmisión:** Medio de transmisión descrita según UIT-TG.652D, en sentido ascendente y descendente bidireccional, que se logra con WDM sobre una fibra para servicios como datos y video [36].
- **Código de línea:** La codificación utilizada en ambos sentidos de transmisión para los niveles lógicos ópticos es NRZ donde el nivel de emisión de luz en alto es para UNO binario y nivel de emisión de luz en bajo es para CERO binario [36].
- **Longitud de onda de operación:** Opera en el intervalo de 1575-1580 nm en sentido descendente; y en sentido ascendente opera entre los 1260-1280 nm [36] como se observa en la Fig. 29:

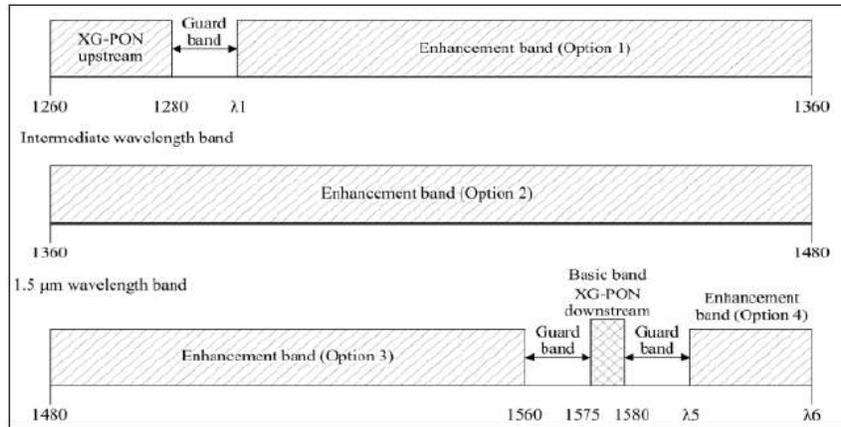


Fig. 29. Asignación de longitudes de onda para XGS-PON [36]

- **Alcance físico:** Como máximo de 20 Km a 40 Km entre la OLT y la ONT [36].
- **Relación de división:** La división va más allá de 1:64 (por ejemplo, 1:128 a 1:256) para mejorar la cobertura general de XGS-PON en comparación con GPON [36].
- **Pérdida entre la OLT y la ONU:** Se observa en la Tabla 4:

Tabla 4. Clases de pérdida en el trayecto óptico para XGS-PON

Pérdida en el trayecto óptico	Clase Nominal N1	Clase Nominal N2	Clase Extendida E1	Clase Extendida E2
Pérdida Mínima (dB)	14	16	15	20
Pérdida Máxima (dB)	29	31	30	35

Nota: Pérdida óptica según ITU-T G.9807.1. [36]

2.8.3. Parámetros en la interfaz óptica en sentido descendente

Las especificaciones ópticas a una tasa de 9953Mbit/s se pueden observar en la Tabla 5, que se consideró para el escenario XGS-PON la potencia de transmisión de la OLT, código NRZ, longitudes de onda de operación entre otras mencionadas:

Tabla 5. Parámetros de la interfaz óptica en sentido descendente para XGS-PON

Elementos	Unidad	Valor			
Transmisor OLT					
Tasa de línea nominal	Gbit/s	9.95328			
Longitud de onda de operación	Nm	1575-1580			
Código de línea	-	NRZ			
Reflectancia máxima del equipo a S/R, medida en la longitud de onda del transmisor	dB	NA			
Mínimo ORL de ODN en O y O (Notas 2 y 3)	dB	Más de 32			
Clases de ODN		N1	N2	E1	E2
Potencia media lanzada mínima	dBm	+2.0	+4.0	+6.0	FFS
Potencia media lanzada máxima	dBm	+5.0	+7.0	+9.0	FFS
Potencia óptica lanzada sin entrada al transmisor	dBm	NA			
Tasa mínima de extinción	dB	8.2			
Tolerancia del transmisor a la potencia óptica reflejada (Nota 7)	dB	Mayor que -15			
Rango de dispersión	ps/nm	0-400			
Relación mínima de supresión de modo lateral	dB	30			
Pérdida máxima del camino óptico diferencial dB	dB	15			
Receptor ONU					
Penalización máxima del camino óptico (Note 6)	dB	1.0			
Reflectancia máxima del equipo R/S, medida en la longitud de onda del receptor	dB	Menos de -20			
Nivel de referencia de tasa de error de bit	-	10 ⁻³ (Nota 4)			
Clases de ODN		N1	N2	E1	E2
Sensibilidad mínima en el nivel de referencia de BER	dBm	-28	-28	-28	FFS
Sobrecarga mínima en el nivel de referencia de BER	dBm	-9.0	-9.0	-9.0	FFS
Inmunidad de dígitos consecutivos idénticos	Bit	Mas de 72			
Tolerancia del receptor a la potencia óptica reflejada	dB	Menos de 10			

Nota: Parámetros en sentido descendente según ITU-T G.9807.1. [36]

2.9. Tecnología NG-PON2

La NG-PON2 (Next Generation Passive Optical Network 2), se estandarizó con la recomendación ITU-T G.989 en el 2015 para las redes pasivas de fibra óptica con velocidades de 10 hasta 40 Gbit/s [37]. Existen 2 tecnologías asignadas en NG-PON2 que son TWDM-PON y PtP WDM-PON, pero este estándar fue definido principalmente para habilitar redes de acceso fijo mediante la configuración TWDM-PON [33].

En la configuración TWDM-PON también se asigna ranuras de tiempo a cada ONU, para conseguir un acceso múltiple por división de tiempo, así como longitudes de onda de subida y bajada, compartidas por otras ONU que pertenecen a la misma red de distribución óptica [33].

2.9.1. Arquitectura de red de NG-PON2

Esta tecnología acoge una arquitectura de red de acceso igual que sus antecesores, con una topología PtM. Se puede apreciar la arquitectura de referencia en la Fig. 30:

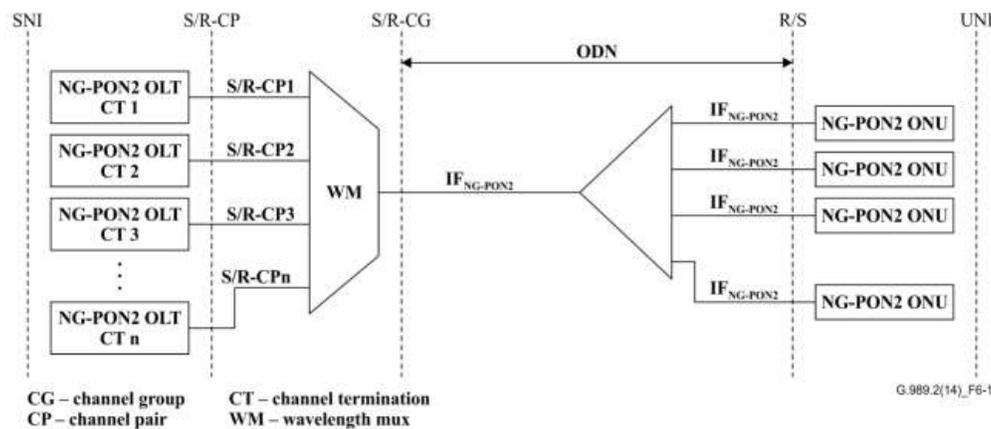


Fig. 30. Arquitectura de red de NG-PON2 [38]

De la figura anterior se puede observar que esta tecnología usa múltiples longitudes de onda, donde la OLT está compuesta por terminaciones de canal CT, conectada a un multiplexor de longitud de onda (WDM). En el punto S/R-CG, es donde la OLT envía y recibe un conjunto de pares de longitudes de onda que pertenecen al sentido ascendente y descendente de la comunicación

(CG). Por lo que la infraestructura perteneciente a la ODN, se incluye desde la salida del WDM hasta la entrada de la ONU o el punto R/S.

2.9.2. Especificaciones técnicas

- **Medio físico y método de transmisión:** Medio de transmisión descrita según ITU-T G.652.D, sentido en la transmisión en sentido ascendente y descendente con un método de transmisión transmisión bidireccional, que se logra con TWDM sobre una fibra [38].
- **Código de línea:** La codificación utilizada para los niveles lógicos ópticos es NRZ [38].
- **Longitud de onda de operación:** Se observan en la Tabla 6:

Tabla 6. Longitudes de onda operativas de NG-PON2

Sistemas de longitud de onda compatibles	TWDM PON		PtP WDM PON
	Bajada	Subida	Bajada/subida
GPON, RF video, XG-PON	1596-1603 nm	Opción de banda ancha: 1524-1544 nm Opción de banda reducida: 1528-1540 nm Opción de banda estrecha. 1532-1540 nm	Espectro expandido: 1524-1625 nm Espectro compartido: 1603-1625 nm

Nota: Plan de longitudes de onda según ITU-T G.989.2. [38]

En el TWDM PON de sentido descendente o bajada, fue diseñado principalmente para evitar interferencias con las señales de video RF y XG-PON. En sentido ascendente las 3 opciones están determinadas por las capacidades del transmisor de la ONT, que permita un mejor control de una banda operativa más estrecha.

Las frecuencias centrales en sentido descendente se muestran en la Tabla 7 para un sistema TWDM-PON, ya que el funcionamiento de esta tecnología utiliza una arquitectura o topología PtM [33].

Tabla 7. Frecuencias centrales en sentido descendente para TWDM-PON

Canal	Frecuencia central (THz)	Longitud de onda (nm)
λ_1	187.8	1596.34
λ_2	187.7	1597.19
λ_3	187.6	1598.04
λ_4	187.5	1598.89
λ_5	187.4	1599.75
λ_6	187.3	1600.60
λ_7	187.2	1601.46
λ_8	187.1	1602.31

Nota: Frecuencias operativas en sentido descendente según ITU-T G.989.2. [38]

- **Alcance físico:** El alcance físico de NG-PON2 tiene dos clases: DD20 que denota una distancia máxima de 20 Km y DD40 a una distancia de hasta 40 Km.
- **Pérdida entre la OLT y la ONU:** Se puede observar 4 clases de pérdida en la Tabla 8:

Tabla 8. Clases de pérdida en el trayecto óptico para NG-PON2

Pérdida en el trayecto óptico	Clase Nominal N1	Clase Nominal N2	Clase Extendida E1	Clase Extendida E2
Pérdida Mínima (dB)	14	16	15	20
Pérdida Máxima (dB)	29	31	30	35

Nota: Pérdida óptica según ITU-T G.989.2. [38]

2.9.3. Parámetros de la interfaz óptica en sentido descendente para NG-PON2

En la Tabla 9 se observa los parámetros de la interfaz óptica para el enlace descendente a una tasa de 2.4883 Gbps y 9.95328 Gbps por cada canal según la recomendación ITU-T G.989.2, como se mencionó, esta tecnología usa 4 canales para la transmisión de datos a través de un puerto mediante WDM, por lo que de acuerdo a estas tasas de datos la capacidad total por puerto puede ser de 10 Gbps o 40 Gbps:

Tabla 9. Parámetros de la interfaz óptica en sentido descendente para NG-PON2

Elementos	Unidad	Valor									
Transmisor OLT											
Tasa de línea nominal	Gbit/s	2.48832				9.95328					
Longitud de onda de operación	nm	1596-1603				1596-1603					
Espacio entre canales	GHz	100				100					
Excursión espectral máxima	GHz	+/- 20				+/- 20					
Código de línea	-	NRZ				NRZ					
Máscara del diagrama de ojo del transmisor	-	Ver cláusula 11.1.5.3				Ver cláusula 11.1.5.3					
Máxima reflectancia del equipo a S/R-cg, medida en la longitud de onda del transmisor	dB	NA				NA					
Mínimo ORL de ODN al S/R-CG	dB	32				32					
Clases de ODN		N1	N2	E1	E2	N1	N2	E1	E2		
Potencia media lanzada mínima	dBm	+0.0	+2.0	+4.0	+6.0	+3.0	+5.0	+7.0	+9.0		
Potencia media lanzada máxima	dBm	+4.0	+6.0	+8.0	+10	+7.0	+9.0	+11.0	+11.0		
Máximo WNE-PSD	dBm (15 GHz)	-63.5				-63.7					
Tasa mínima de extinción	dB	8.2				8.2					
Tolerancia del transmisor a la potencia óptica reflejada (Nota 7)	dB	-15				-15					
Rango de dispersión	ps/nm	0-400 (DD20) 0-840 (DD40)				0-400 (DD20) 0-840 (DD40)					
Relación mínima de supresión de modo lateral S/R-CP	dB	30				30					
Generación de Jitter	-	Ver clausula 11.1.5.4.3				Ver clausula 11.1.5.4.3					
Receptor ONU											
Penalización máxima del camino óptico (Nota 6)	dB	1.0				2.0					
Reflectancia máxima del equipo R/S, medida en la longitud de onda del receptor	dB	-20				-20					
Nivel de referencia de tasa de error de bit	-	10-4 (Nota 7)				10-3 (Nota 7)					
Clases de ODN		N1	N2	E1	E2	N1	N2	E1	E2		
Sensibilidad mínima en el nivel de referencia de BER	dBm	-30.0	-30.0	-30.0	-30.0	-28.0	-28.0	-28.0	-28.0		
Sobrecarga mínima en el nivel de referencia de BER	dBm	-10.0	-10.0	-10.0	-10.0	-7.0	-7.0	-7.0	-9.0		
Inmunidad de dígitos consecutivos idénticos	bit	72				72					

Nota: Parámetros en sentido descendente según ITU-T G.989.2. [38]

2.9.4. Capacidad de sintonización de longitud de onda en las ONU

Una característica importante de la tecnología NG-PON2 con respecto a GPON y XGS-PON, es la compatibilidad de la red de distribución óptica conformada por componentes pasivos o divisores de potencia, pero a diferencia de las mencionadas, se trata del primer estándar que maneja múltiples longitudes de onda para la transmisión de datos utilizando WDM, por lo que una característica importante de esta tecnología es la capacidad de sintonización de cada ONU que conforma una red NG-PON2, equipado con un transmisor y receptor sintonizable. Si existiera un dispositivo WDM en la ODN, este tendría que seleccionar y asignar la longitud de onda operativa de cada ONU y así tenga la capacidad de sintonizar el canal que se le asigne [33].

Para que esta tecnología cuente con una mayor flexibilidad y escale en capacidad, se espera que las ONU tengan la capacidad de operar en más de una longitud de onda en simultáneo, debido a la incorporación de un elemento multiplexor de longitud de onda que complementará al divisor de potencia, de este modo, se logra escalar en velocidad al transmitir y recibir en más de una longitud de onda de forma simultánea, lo cual refuerza la necesidad de que las ONU dispongan de esta característica de sintonización. Por otro lado, las OLT no deben disponer de esta capacidad de sintonización, solo deberán recibir las longitudes de onda totales transmitidas por las ONU, y diferenciar al receptor de destino de cada uno de estos mensajes, por lo que los sistemas NG-PON2 no pueden depender del filtrado estático de longitudes de onda en la ODN, ya que los distintos componentes espectrales podrían quedar sintonizados dentro de la banda de rechazo del filtro, dando lugar a pérdidas de señales de interés [33].

Otra característica específica los dispositivos sintonizables es su tiempo de sintonización, que se define como el tiempo transcurrido desde el momento en que el dispositivo sintonizable deja el canal de longitud de onda origen, hasta el momento en el que alcanza el canal de longitud de onda destino. Estos dispositivos sintonizables que soportan las diferentes clases de sintonización para permitir una gama de capacidades en el sistema NG-PON2, pueden basarse en una variedad de tecnologías que tienen costos potencialmente diferentes [33].

2.10. Parámetros del rendimiento de un sistema

2.10.1. Tasa de error de Bits (BER)

El BER define un porcentaje de bits errados en relación de todos los bits que se da en un enlace del transmisor y receptor, este parámetro se calcula en un rango determinado de tiempo. Está dada por la siguiente relación:

$$BER = \frac{N_e}{N_t} \quad (2.7)$$

Donde:

N_e : Número de bits errados que ocurren en un tiempo t .

N_t : Número de total de bits transmitidos en un tiempo t .

2.10.2. Diagrama del ojo

El diagrama de Ojo muestra la superposición de las distintas combinaciones posibles de unos y ceros de señales transmitidas de un enlace en un rango de tiempo o cantidad de bits determinados, permiten obtener las características de los pulsos que se propagan por el medio de comunicación, sean estos por medio de fibra óptica, coaxial, par trenzado, enlaces satelitales, etc [39]. El diagrama de ojo se puede observar en la Fig. 31:

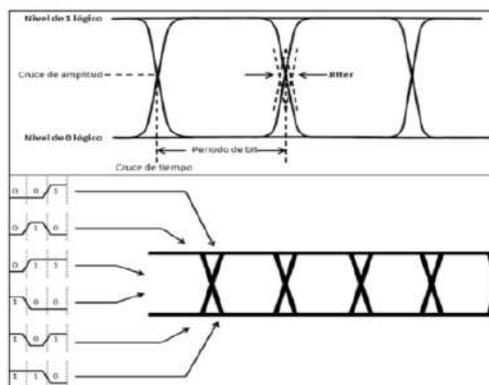


Fig. 31. Diagrama de ojo [39]

2.10.3. Factor Q

Se obtiene de la relación señal a ruido eléctrico (ESNR) a la entrada del circuito selector en el receptor. El Factor Q nos puede brindar una evaluación de la calidad de funcionamiento esperado de un sistema de comunicación, donde el valor específico es de un valor mínimo de 6 (ITU-T O.201) [40]. Para obtener el Factor Q, de un bit en el instante de decisión del receptor, se calcula de acuerdo a ciertos parámetros del diagrama de ojo como se observa en la Fig. 32:

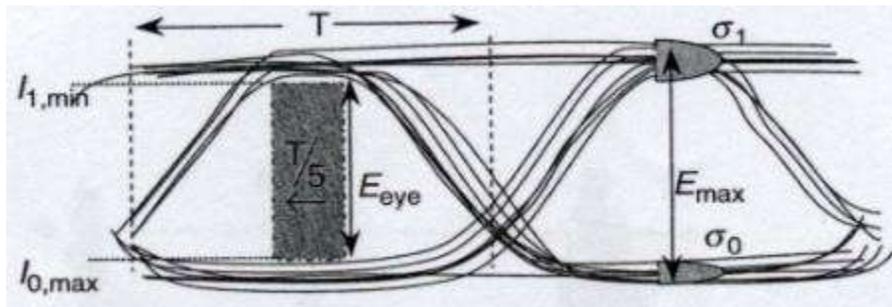


Fig. 32. Factor Q a partir del diagrama de ojo [41]

Del gráfico anterior se tiene:

$$E_{eye} = I_{1,min} - I_{0,max} \quad (2.8)$$

$$Q \cong \frac{E_{eye}}{\sqrt{|\sigma_0^2 - \sigma_1^2|}} \quad (2.9)$$

Donde:

$I_{1,min}$: Umbral mínimo para 1 lógico.

$I_{0,max}$: Umbral máximo para 0 lógico.

E_{eye} : Apertura de ojo

σ_1 : Desviación estándar en el nivel lógico 1.

σ_0 : Desviación estándar en el nivel lógico 0.

Q: Factor Q

La tasa de error de bit (BER) en función del Factor Q para una modulación OOK, está definida por la siguiente ecuación:

$$BER \cong \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \quad (2.10)$$

Donde la función *erfc* es la función de error complementaria [42].

CAPÍTULO III: DESCRIPCIÓN Y EVALUACIÓN DE LA RED

3.1. Descripción de la red

Para realizar la investigación, se describe la zona de estudio, así como los equipos y elementos ópticos que conforman la red GPON implementada. Esta red en cuestión pertenece a una empresa proveedora de servicios de internet que cuenta con cobertura por diversas zonas de la región de Cusco, pero se tomó en cuenta el Centro Histórico, debido a que esta zona cuenta con una alta demanda de servicios como voz, datos y video, por lo que sería una de las primeras en migrar a las tecnologías PON de nueva generación, aprovechando el máximo de la red de distribución óptica. La descripción está conformada de la siguiente manera:

- **Zona de estudio:** Se describe el área de cobertura que abarca la zona de estudio de la red GPON, implementada actualmente.
- **Control y administración de la red:** Se describe y se hace mención de manera general el control, monitoreo y administración de esta red desde la oficina central del proveedor, la interconexión con el nodo Arcopata, así como los equipos utilizados.
- **Equipos y elementos de transmisión:** Se describe los equipos y elementos activos y pasivos que se encuentran en el nodo transmisor.
- **Red de distribución óptica y elementos de planta externa:** Se describen los elementos y materiales pasivos, tipos de fibra, entre otros que conforman la planta externa de la red.
- **Equipos y elementos de recepción:** Se describen los equipos, materiales y elementos que se encuentran en los usuarios finales de la red.
- **Evaluación de los efectos en el enlace óptico, capacidad y escalabilidad:** Se hace la evaluación de la red mediante un cálculo aproximado de las pérdidas ópticas y dispersión para cada tecnología, tomando en cuenta el usuario más lejano. Así mismo, una evaluación de las capacidades de la tasa de datos y relaciones de división, que se pueden presentar.

3.1.1. Zona de estudio

La zona de estudio tiene lugar una red FTTH con tecnología GPON. Esta red tiene como transmisor el nodo de Arcopata (13°30'57.93"S latitud y 71°59'13.14"O longitud) donde se encuentra la OLT, con una cobertura actual de 1.2 km². En esta investigación el área de cobertura de la zona de estudio descrita es de aproximadamente 0.47 km², teniendo en cuenta las troncales, cajas de distribución y abonados que se encuentran entre las calles y plazas principales del centro histórico, que se detalla más adelante. En la Fig. 33, se puede observar el área de la zona de estudio:



Fig. 33. Zona de estudio

Esta red implementada pertenece a la empresa Internet Perú Cable S.A.C., que brinda servicios de datos y video en diversas zonas de la región de Cusco, mediante FTTH con tecnología GPON y PtP, tanto para usuarios domiciliarios y empresariales, donde la zona del Centro Histórico del Cusco presenta una gran cantidad de abonados que hacen uso de estos servicios. Esta red con tecnología GPON se encuentra parcialmente instalada, por lo que se hizo una revisión de los equipos terminales, troncales, elementos de interconexión entre otros que la conforman actualmente. Se espera abarcar una mayor cobertura en cuanto a la red de distribución óptica propuesta y poder realizar una migración con las tecnologías PON de nueva generación.

3.1.2. Control y administración de la red GPON

La red GPON con nodo transmisor en Arcopata en donde se encuentra la OLT, está controlada y administrada desde la oficina central del proveedor ubicada en la urbanización de Tupac Amaru del distrito de San Sebastián (13°32'18.43"S latitud y 71°54'31.55"O longitud) a través de una interconexión PtP por medio de un hilo de fibra (ADSS G.652.D de 48 hilos), haciendo un recorrido de aproximadamente de 11 km. En la Fig. 34 se puede observar esta interconexión:



Fig. 34. Recorrido de la fibra de interconexión de la central con nodo Arcopata

En esta interconexión tanto del envío de datos como el control y administración de la red Arcopata, se utilizan Routers Core de la marca Mikrotik, estos son los modelos CCR-2004 ubicado en la oficina central y el CCR-1036 ubicado en el nodo de Arcopata a través de módulos SFP+ bidireccionales de alta capacidad con tasas de transmisión de aproximadamente 10 Gbps con un alcance de 20 km que operan en las bandas 1350 nm y 1550 nm. En el recorrido de la interconexión, existen otros nodos (Grau y Tantalean) con tecnología GPON compartiendo el mismo recorrido del cable de fibra, pero conectados a la oficina central con hilos independientes para brindar datos y video a los usuarios de estas zonas. En la Fig. 35, se observa el diagrama de interconexión:

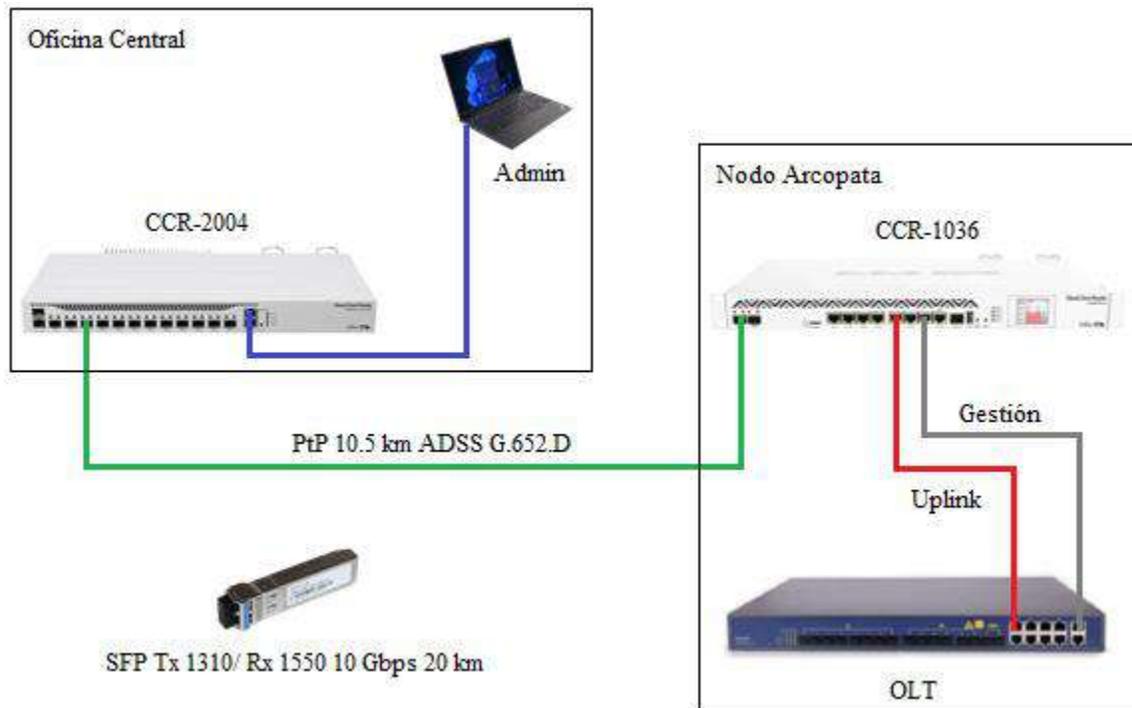


Fig. 35. Diagrama de interconexión entre la central y la OLT [43], [44], [45]

Para lograr la comunicación de estos equipos, es importante conocer las interfaces y configuraciones, así como ciertos protocolos de red necesarios para el funcionamiento correcto de todas las redes, pero abordar y detallar estos aspectos que tratan de la parte lógica de la red, queda fuera del objetivo de esta investigación, puesto que la evaluación del rendimiento, solo se relaciona con la parte física de la red.

Cabe mencionar que el control y administración de la red GPON de esta empresa, seguirá teniendo la misma infraestructura física, salvo la integración de otros equipos de mayor capacidad y el manejo de nuevos protocolos a futuro. Incluso si se logra migrar con las tecnologías PON de nueva generación, ya que fueron estandarizadas para ser compatibles.

3.1.3. Elementos y equipos de transmisión

En la parte del transmisor, se encuentra la terminal de línea óptica (OLT) que es el equipo activo de la red que convierten la señal eléctrica a óptica y la transmiten hacia las ONU a través de la ODN, además de elementos y componentes de interconexión que permiten la comunicación ascendente y descendente con los abonados que se encuentran en la zona de estudio. Actualmente existe diferentes marcas de OLT con el estándar GPON, aunque recientemente existen OLT con la capacidad de soportar el estándar XGS-PON. La OLT utilizada en la red es la siguiente:



Fig. 36. OLT Optictimes LT-RG8608 8 puertos GPON [45]

Sus especificaciones técnicas más relevantes se observan en la Tabla 10:

Tabla 10. Especificaciones técnicas OLT Optictimes LT-RG8608

	Descripción	Valor
1G/10G Puerto de enlace ascendente	Cantidad	16
	RJ45 (GE)	8
	SFP (GE)	6
	SFP+ (10GE)	2
Puerto GPON	Cantidad	8
	Interfaz física	SFP slot
	Clase de ODN	B+/C+
	Relación de división máxima	≤ 1:128
Puertos de gestión	1*10/100 BASE-T out-band port, 1*CONSOLE port	
Especificaciones del puerto PON	Distancia de transmisión (km)	20
	Velocidad Up/Down (Gbps)	1.244 / 2.488
	Longitud de onda Tx/Rx (nm)	1490 / 1310
	Tipo de conector	SC/UPC
	Tipo de fibra	9/125μm SMF

Nota: Obtenido de Optictimes. [45]

En este equipo están insertados los módulos SFP GPON clase B+, que convierten la señal eléctrica a señal óptica y la transmiten por medio de la ODN hacia las ONU de los usuarios. Para ello se hace uso de patchcords SC-UPC/APC, que conecta el lado del conector SC-UPC al puerto SFP y el otro conector hacia la entrada de un ODF. En la Tabla 11, se describe los parámetros más relevantes de un SFP GPON clase B+ marca Furukawa:

Tabla 11. Parámetros de SFP GPON Furukawa clase B+

Parámetro	Valor mínimo	Valor típico	Valor máximo
Transmisión			
Tipo de transmisión	1490 nm DFB Laser CW mode		
Vel. de señalización +/-100 ppm (Mbps)	2488 descarga/1244 subida		
Potencia media de emisión (dBm)	1.5	-	5
Longitud de onda central (nm)	1480	1490	1500
Tasa de extinción (dB)	8.2	-	-
Recepción			
Tipo de recepción	1310 nm APD/TIA Burst mode		
Longitud de onda de recepción (nm)	1260	1310	1360
Sensibilidad de recepción (dBm)	-	-	-28
Sobrecarga óptica de recepción (dBm)	-8	-	-
Perdida máxima de inserción (dB)	-	-	2

Nota: Obtenido de Furukawa Electric-Especificaciones técnicas SFP GPON. [22]

En la salida del ODF, los hilos habilitados son etiquetados y empalmados mediante una fusión con los hilos de fibra ADSS G.652.D, en este caso con una fibra de 96 hilos de los cuales, los hilos utilizados para las troncales van dirigidas a las diferentes zonas que abarca esta red. Los hilos fueron designados y organizados a criterio del diseñador, de acuerdo al código de colores característico de este tipo de fibra, y lograr así la interconexión con los usuarios que están ubicados en la zona de estudio. En la Fig. 37, se observa el diagrama de interconexión de la OLT con los elementos ópticos que integran el nodo transmisor de Arcopata:

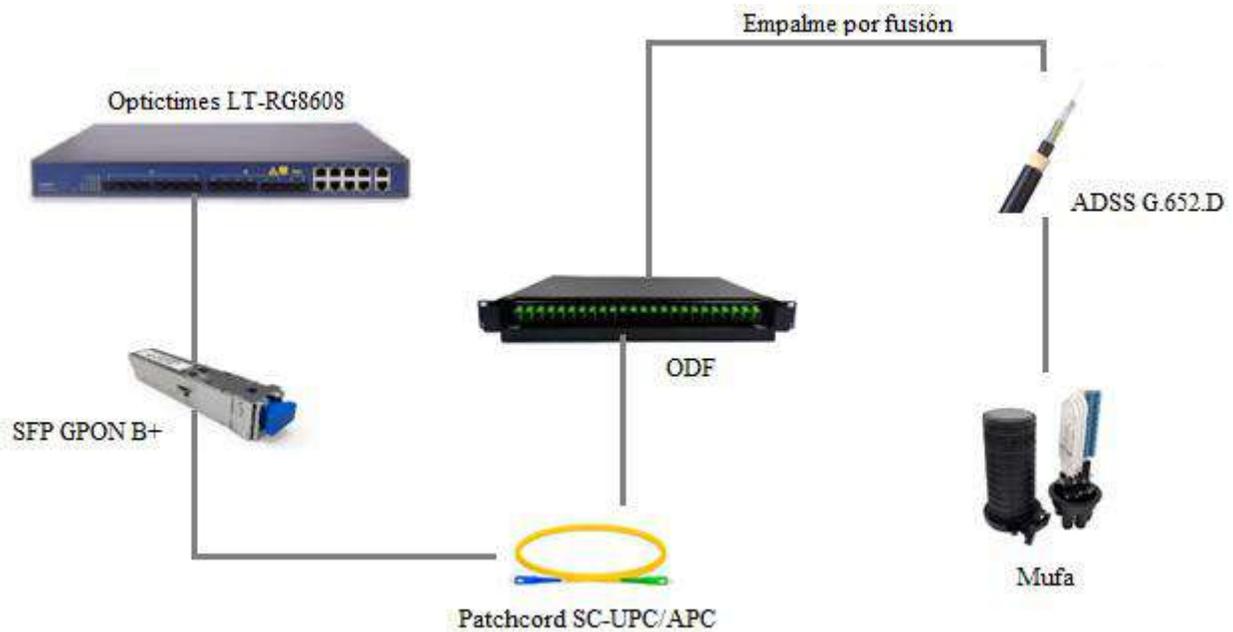
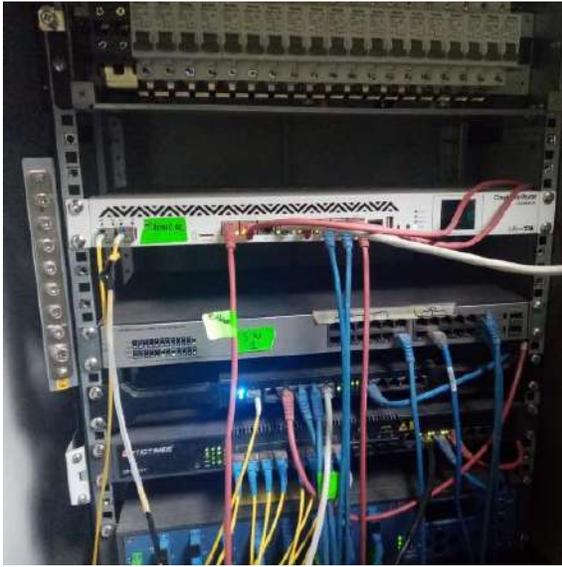


Fig. 37. Interconexión entre la OLT y elementos que integran el transmisor

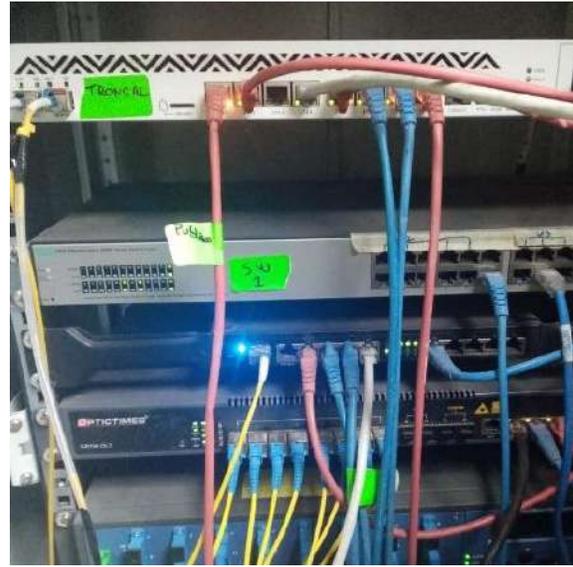
Una característica importante de esta OLT es que necesita de un Router administrador para realizar el control y administración del ancho de banda, así como de los protocolos necesarios de enrutamiento, para asegurar la interconectividad con los usuarios, como es el caso del CCR-1036, ya que, en este modelo de OLT, hacerlo de manera directa por lo general, se producen problemas de sobrecarga en el equipo. Sin embargo, existen otras marcas de equipos OLT más robustas y con mejores características de *hardware* que pueden realizar esta función directamente, sin presentar problemas en la interconexión.

3.1.3.1. Imágenes del nodo transmisor Arcopata

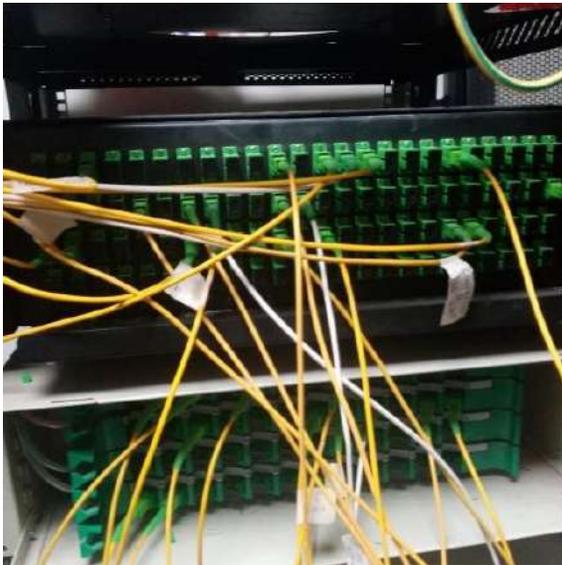
En las siguientes imágenes, se pueden observar algunos de los equipos activos que integran el nodo transmisor ubicado en Arcopata:



(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 38. (a) Equipos de activos del nodo transmisor (b) Conexiones entre equipos (c) ODF (d) Potencia de Tx de un SFP GPON clase B+

En la Fig. 38 (d), se puede observar la potencia transmisión de salida, medida en un SFP GPON clase B+ con un valor de +4.65 dBm en 1490 nm, en una prueba realizada con otro equipo, puesto que no se pudo realizar la medición directa de OLT que se encuentra en Arcopata, debido a que todos los puertos PON se encontraban en funcionamiento.

La potencia de transmisión de un SFP GPON Clase B+ rara vez alcanza su valor máximo debido a la necesidad de mantener la estabilidad, fiabilidad, y eficiencia del enlace óptico. Los márgenes de seguridad, las consideraciones de red, las regulaciones y la optimización del consumo de energía juegan un papel crucial en la determinación de la potencia de transmisión real, garantizando un funcionamiento seguro y prolongado del dispositivo. Según la recomendación ITU-T G.984.2, la potencia de transmisión de un SFP GPON Clase B+ en buen estado generalmente debe estar entre los valores de +1.5 dBm a +5 dBm, por lo que la potencia de transmisión de este SFP es óptima para realizar un despliegue.

3.1.4. Red de distribución óptica y elementos ópticos de planta externa

La ODN de la red GPON, está conformada por la fibra ADSS saliente desde el nodo, fibras de derivaciones, así como los empalmes, mufas, splitters, cajas de distribución y cables de acometida, que llegan hasta las ONU de los diferentes usuarios que se encuentran en el Centro Histórico de la Ciudad del Cusco. La red comprende un área de mayor cobertura, pero para esta investigación se tomó en cuenta las troncales, las cajas de distribución y los usuarios que se encuentran ubicados en la zona de estudio.

Se tiene una propuesta de diseño completa de la red GPON que abarca las principales zonas del centro histórico, pero actualmente existe un despliegue e implementación parcial de esta red que se viene realizando, esto debido a las dificultades que presenta la infraestructura, saturación de cables de otras empresas, así como el tráfico peatonal y vehicular de las calles de esta zona que no permite la instalación total de la red. En la Fig. 39 se puede observar las troncales principales de la red GPON actual:

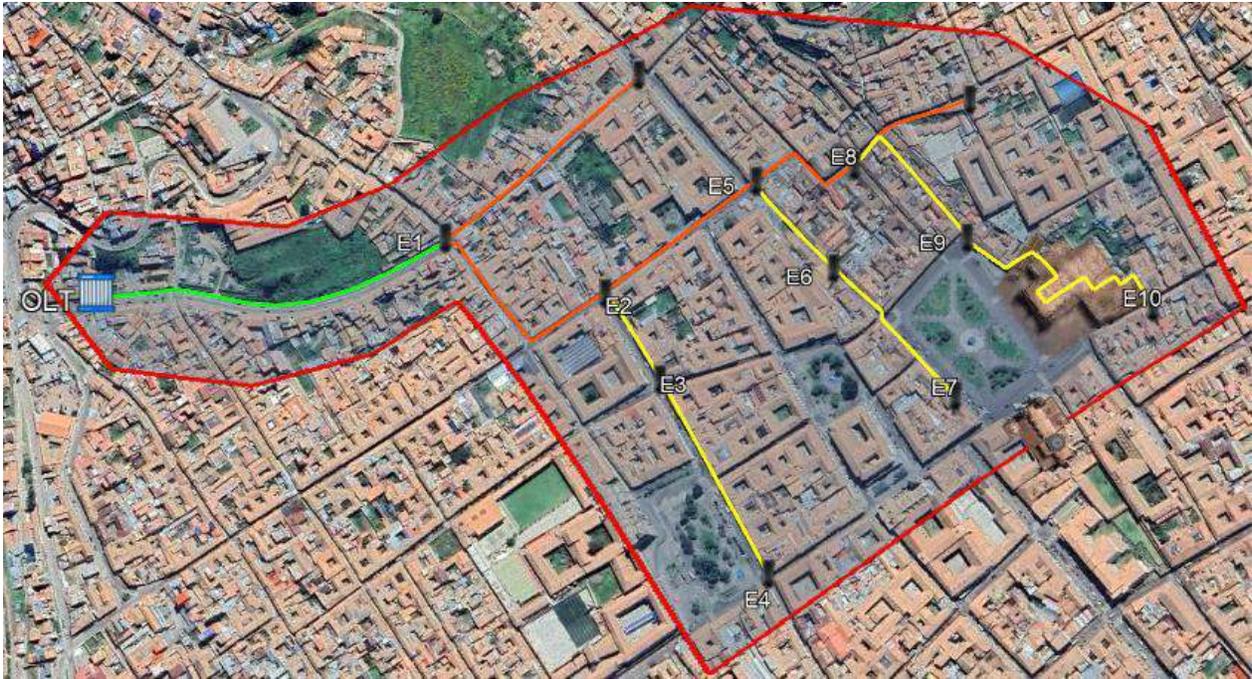


Fig. 39. Troncales y derivaciones de la red GPON

De la figura anterior, la troncal principal que sale del nodo Arcopata representada de color verde, es la fibra ADSS G.652.D de 96 hilos con un recorrido de 440 m aproximadamente a través de la Av. Arcopata hasta el empalme o derivación E1, incluyendo el vano y reservas. De la derivación E1, salen dos derivaciones, de la cual la ruta de color naranja que se dirige desde E1 pasando por E2, E5 y E8, representan una troncal de fibra ADSS G.652.D de 48 hilos.

De la derivación E2, pasando por E3 hasta E4, es una fibra de 24 hilos, así mismo, de E5 pasando por E6 hasta E7 por una fibra de 12 hilos y de E8 hasta E10 por una fibra 24 hilos, todas representadas de color amarillo. En estas cajas de empalme y derivaciones se fusionan los hilos de fibra habilitados correspondientes, que vienen de los puertos SFP de la OLT hacia los splitter o divisores de potencia de primer nivel que alimentan o dan señal a las cajas de distribución. En la Fig. 40, se puede observar el diseño preliminar propuesto de la red GPON en la zona de estudio:

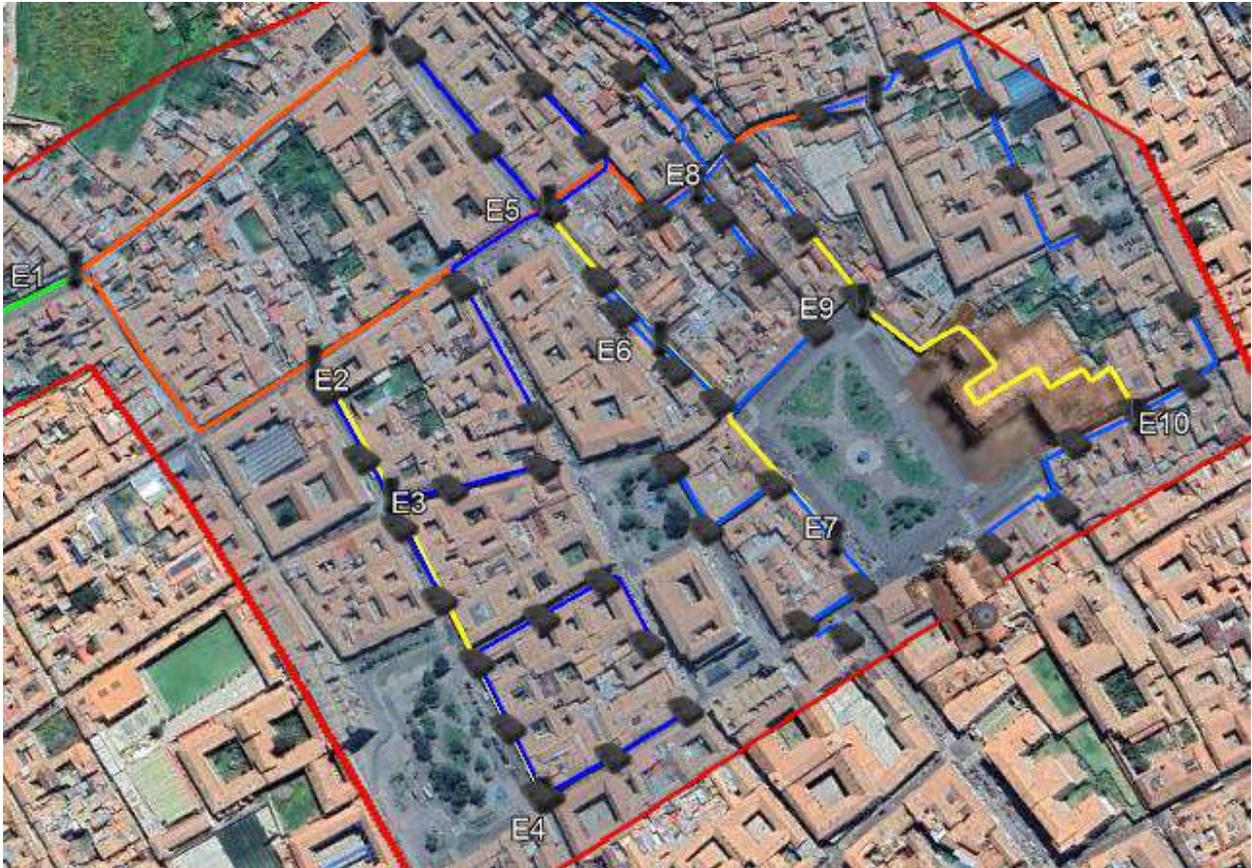


Fig. 40. Propuesta de diseño para la red GPON del centro histórico

Las líneas de azul representan fibra ADSS de 6 hilos, que salen de las derivaciones o mufas donde se encuentran los splitters de primer nivel. El acoplamiento de los hilos provenientes de los puertos SFP del transmisor con los splitters, se hace mediante empalmes por fusión, ya que los splitter de primer nivel vienen fabricados para ser fusionados. Según el diseño y el de algunos splitter implementados actualmente, son del tipo balanceado de 1x4 y 1x8 salidas, lo que significa que, a cada caja de distribución le corresponde un hilo correspondiente salientes del splitter, y cada caja NAP está instalada por splitter de 1x8 (segundo nivel) en general, salvo algunos que cuentan con splitter de mayores salidas. Al ser una red parcialmente implementada, se puede dar modificaciones en el splitteo con el transcurso del tiempo, incluso utilizando splitters desbalanceados que tienen una ventaja en cuanto al tiempo de instalación, pero este tema queda fuera de discusión. En la Fig. 41, se puede observar la distribución actual de la red.

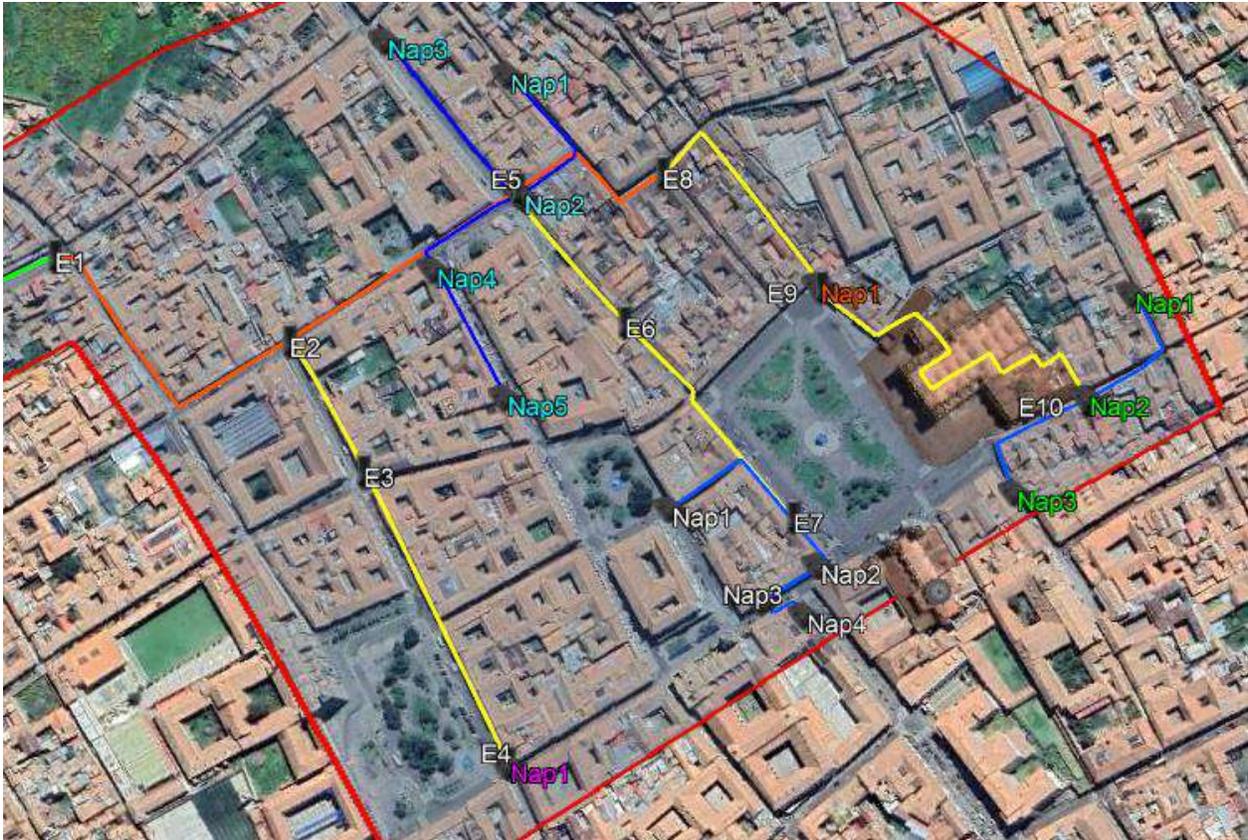


Fig. 41. Distribución actual de la red GPON

En la Tabla 12 se observa la leyenda de los elementos que integran la ODN:

Tabla 12. Leyenda de elementos de la ODN

Ícono	Descripción
	Fibra óptica ADSS G.652.D de 96 hilos
	Fibra óptica ADSS G.652.D de 48 hilos
	Fibra óptica ADSS G.652.D de 12 o 24 hilos
	Fibra óptica ADSS G.652.D de 6 hilos
	Mufa de empalmes (derivaciones y/o splitters de primer nivel)
	Caja NAP o terminal de distribución (splitters de segundo nivel)

En la Tabla 13 se describe la ubicación de las derivaciones principales, así como de las cajas de distribución que actualmente se encuentran instaladas:

Tabla 13. Coordenadas geográficas de las derivaciones y de cajas NAP actuales

Derivaciones			
E1		13°30'56.68"S	71°59'1.41"O
E2		13°30'58.42"S	71°58'56.08"O
E3		13°31'1.31"S	71°58'54.31"O
E4		13°31'7.86"S	71°58'50.81"O
E5		13°30'54.81"S	71°58'50.87"O
E6		13°30'57.77"S	71°58'48.30"O
E7		13°31'2.13"S	71°58'44.24"O
E8		13°30'54.39"S	71°58'47.50"O
E9		13°30'56.88"S	71°58'43.71"O
E10		13°30'59.33"S	71°58'37.42"O
Cajas NAP			
E4	Nap1	13°31'7.96"S	71°58'50.75"O
E5	Nap1	13°30'52.32"S	71°58'51.10"O
	Nap2	13°30'55.03"S	71°58'50.72"O
	Nap3	13°30'51.62"S	71°58'53.97"O
	Nap4	13°30'56.76"S	71°58'52.72"O
	Nap5	13°30'59.60"S	71°58'51.00"O
E7	Nap1	13°31'2.05"S	71°58'47.09"O
	Nap2	13°31'3.28"S	71°58'43.56"O
	Nap3	13°31'4.13"S	71°58'44.89"O
	Nap4	13°31'4.42"S	71°58'43.86"O
E9	Nap1	13°30'56.88"S	71°58'43.72"O
E10	Nap1	13°30'56.95"S	71°58'36.38"O
	Nap2	13°30'59.33"S	71°58'37.42"O
	Nap3	13°31'1.50"S	71°58'38.98"O

3.1.4.1. Imágenes de elementos de la ODN de la red y mediciones de potencia



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Fig. 42. (a) Salida del cable ADSS del nodo. Derivaciones: (b) E1 (c) E2 (d) E5 (e) E8 (f) E9



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Fig. 43. Cajas de distribución: (a) Nap5-E5 (b) Nap4-E5 (c) Nap2-E5 (d) Nap1-E7 (e) Nap2-E10 (f) Nap1-E10

En las siguientes imágenes se pueden observar mediciones de potencia de algunas cajas NAP de la red, que se encuentran actualmente instaladas:



(a)



(b)



(c)

Fig. 44. Potencia medida en: (a) Nap3-E5 (b) Nap2-E5 (c) Nap1-E7

Según estas potencias de recepción medidas en las cajas NAP, están entre los -16.8 a -18.5 dBm, lo que se considera aceptable para garantizar un funcionamiento adecuado de la red y también proporcionan un margen de seguridad razonable que está por encima del límite inferior de sensibilidad de una ONU GPON que es de -28 dBm (según la recomendación ITU-T G.984.2).

Esto significa que, aunque haya pérdidas adicionales en la red (como conexiones o empalmes en mal estado, deterioro de componentes por factores externos, entre otros), la señal aún puede ser procesada correctamente.

3.1.5. Equipos y elementos de recepción

En los usuarios finales es donde se encuentra los equipos receptores ópticos, junto con otros elementos ópticos de interconexión para recibir la señal de datos, como la unidad de red óptica (ONU). Este dispositivo proporciona a los usuarios múltiples interfaces de servicio. La ONU convierte las señales ópticas a señales eléctricas y viceversa, además de convertir señales de voz de D/A y A/D, reutilizar, procesar señales y gestionar el mantenimiento. Entre sus características más relevantes se tiene:

- Servicio Triple Play: Suministro de datos, IPTV (televisión en red interactiva), VOIP (mediante IAD, dispositivo de acceso integrado) y otros servicios.
- Recibir datos de transmisión enviados por OLT.
- Recopilar y almacenar en caché los datos de Ethernet que deben enviar los usuarios y enviar los datos a la OLT de acuerdo con la ventana de envío asignada.
- Ofrecer abundantes capacidades de administración remota respaldadas por la administración y mantenimiento de operaciones (OAM).

Se describen las ONU actualmente utilizadas:

Tabla 14. Unidades de red óptica (ONU) utilizados en la red

Unidad de red óptica	Artículo técnico	Descripción	Valor
 Optictimes RX5104WT	Interface PON	G/E PON (GPON clase B+)	-
		Sensibilidad de recepción (dBm)	≤ -28
		Potencia óptica de transmisión (dBm)	0 ~ 4
		Distancia de transmisión (km)	20
		Capacidad máxima up/down (Gbps)	1.244/2.488
		Longitud de onda Rx/Tx (nm)	1490/1310
	Interfaz óptica	SC/APC	-
Interface LAN	4 x 1/10/100 Mbps interface ethernet auto adaptativo, RJ45	-	
 Data FD704GW	Interface PON	G/E PON (GPON clase B+)	-
		Sensibilidad de recepción (dBm)	≤ -28
		Potencia óptica de transmisión (dBm)	0.5 ~ 5
		Distancia de transmisión (km)	20
		Capacidad máxima up/down (Gbps)	1.244/2.488
		Longitud de onda Rx/Tx (nm)	1490/1310
	Interfaz óptica	SC/APC	-
Interface LAN	4 x 1/10/100 Mbps interface ethernet auto adaptativo, RJ45	-	
 Huawei EG8145V5	Interface PON	GPON (clase B+)	-
		Sensibilidad de recepción (dBm)	≤ -27
		Potencia óptica de transmisión (dBm)	0.5 ~ 5
		Distancia de transmisión (km)	20
		Capacidad máxima up/down (Gbps)	1.244/2.488
		Longitud de onda Rx/Tx (nm)	1490/1310
	Interfaz óptica	SC/APC	-
Interface LAN	4 x 1/10/100 Mbps interface ethernet auto adaptativo, RJ45	-	

Nota: Obtenido de Optictimes, C-DATA, HUAWEI. [46], [47], [48]

En las siguientes figuras, se puede observar las potencias de recepción en las ONU de algunos clientes activos de la red GPON, que se encuentran en el Centro Histórico:

```
OLT-CUS-ARPT(config-if-gpon-0/1)#display ont optical-info 3 all
{ <cr>||<K> }:
```

Command:
display ont optical-info 3 all

ONT ID	Rx power (dBm)	Tx power (dBm)	OLT Rx power(dBm)	ONT Temperature (C)	Voltage (V)	Current (mA)
0	-22.44	1.66	-26.03	16	3.360	33
1	-21.74	2.04	-27.45	36	3.220	11
2	-18.96	2.60	-22.45	28	3.260	15
3	-23.66	2.45	-26.03	33	3.280	13
4	-21.30	2.48	-24.32	37	3.260	16
5	-20.70	3.04	-21.31	27	3.300	14
6	-21.36	2.56	-24.44	31	3.260	14
7	-21.55	2.63	-24.44	37	3.280	17
8	-20.50	2.49	-20.18	30	3.320	18
9	-23.46	2.63	-26.20	33	3.300	17
10	-21.67	3.10	-23.88	31	3.260	17
11	-18.96	3.28	-21.20	30	3.260	13
12	-20.36	1.90	-21.49	39	3.280	12

Fig. 45. Potencias de recepción en las ONU de E5

```
OLT-CUS-ARPT(config-if-gpon-0/1)#display ont optical-info 1 all
{ <cr>||<K> }:
```

Command:
display ont optical-info 1 all

ONT ID	Rx power (dBm)	Tx power (dBm)	OLT Rx power(dBm)	ONT Temperature (C)	Voltage (V)	Current (mA)
0	-20.65	1.78	-22.84	18	3.320	13
1	-19.43	2.09	-23.77	36	3.240	12
2	-17.23	1.93	-22.22	39	3.240	14
3	-18.24	2.55	-22.37	31	3.300	15
4	-24.43	2.50	-28.87	36	3.260	16
5	-18.41	2.61	-21.49	36	3.260	20
6	-18.82	2.61	-21.43	25	3.280	14

Fig. 46. Potencias de recepción en las ONU de E7

Estas fluctuaciones en las potencias de recepción se deben a múltiples factores como la distancia entre el usuario y las cajas NAP, la calidad de los componentes ópticos, la distribución de la señal mediante splitters, las variaciones en los transceptores y las condiciones ambientales. Estos factores son difíciles de controlar completamente, lo que explica por qué diferentes usuarios del mismo puerto PON pueden tener potencias de recepción muy diferentes.

3.2. Evaluación del enlace óptico de la red

Un aspecto importante en el diseño e implementación de redes ópticas es la evaluación de los efectos que influyen en la transmisión, como es el cálculo de la pérdida óptica y la dispersión, lo que permite tener una interconexión óptima entre el transmisor y los receptores, para ello se incluyen los componentes pasivos y activos que la integran. La pérdida de componentes pasivos la conforma la pérdida en la fibra, pérdida en conectores, empalmes y también se incluyen los acopladores y splitters en el enlace, que son usados en las tecnologías PON.

En las tecnologías mencionadas, se debe tener las especificaciones para transmitir, recibir potencia óptica y recibir sensibilidad, ya que exceder el rango provocará que la ONU no se conecte. El cálculo del presupuesto de enlace ODN y la pérdida de potencia óptica deben planificarse con anticipación, por lo que se comprobó este cálculo de la red implementada, de acuerdo a la recomendación ITU-T G.984.2 clase B+/C+, que son las clases extendidas actualmente utilizadas por el proveedor. En la Tabla 15, se describe las especificaciones más relevantes:

Tabla 15. Clases extendidas B+/C+

	Clase B+	Clase C+
Perdida máxima de enlace óptico (dB)	28	31
Perdida mínima de enlace óptico (dB)	13	11
Potencia de transmisión media mínima (dBm)	1.5	3
Potencia de transmisión media máxima (dBm)	5	7
Sensibilidad de recepción ONU (dBm)	-28	-30

Nota: Tabla según recomendación ITU-G.984.2. [35]

Según la recomendación ITU-T G.984.2, la potencia mínima de entrada en la interfaz R'/S' es de -23 dBm para lograr una tasa de error de bit de 10^{-10} en la ONU, antes de la etapa de corrección de errores (FEC) [49].

En el caso de la red implementada, el diagrama general que representa la interconexión de todos los elementos ópticos que integran la red GPON, se observa en la Fig. 47:



Fig. 47. Diagrama general de interconexión de la red GPON

Para la evaluación del cálculo de la pérdida óptica de la red GPON, así como de los otros efectos que afectan la transmisión, se tomó como referencia la caja de distribución más lejana, desde el nodo transmisor hasta la caja ubicada en la calle palacio (13°30'56.95"S latitud 71°58'36.38"O longitud) como se observa en la Fig. 48:



Fig. 48. Recorrido del enlace de fibra hasta la caja NAP más lejana (NAP1-E10)

De acuerdo a esta ruta, en la Tabla 16 se puede ver los datos obtenidos en un escenario de instalación óptimo (considerando las pérdidas mínimas de los componentes como conectores, empalmes y splitters, sin considerar las pérdidas adicionales que son producidas por factores ambientales, curvaturas, daños físicos, entre otros) de los elementos ópticos que conforman el recorrido desde la OLT hasta la caja Nap1-E10 del usuario más lejano, que pertenece a la derivación E10, teniendo en cuenta las especificaciones de las propiedades ópticas para las fibras G.652.D y G.657.A (véase anexo B), para diferentes longitudes de onda:

Tabla 16. Datos del enlace óptico del usuario más lejano

Elemento			Distancia promedio (km)	Cantidad	Atenuación promedio (dB/km)	Dispersión cromática (ps/nm/km)	PMD ($\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$)
Empalme por fusión			-	9	0.02	-	-
Conectores			-	3	0.1	-	-
Divisores ópticos (Splitters) 1x8			-	2	10.38	-	-
Fibra óptica G.652.D y G.657.A	Descarga	1490 nm	1.9	-	0.24	14	0.2
		1577 nm			0.19	18.5	
		1596.34 - 1598.89 nm			0.19	19.5	
	Subida	1310 nm		-	0.35		0.2
		1270 nm			0.37	-3.5	
		1532 - 1540 nm			0.21	16	

Como se describió en la parte de los equipos y elementos de transmisión, la OLT GPON clase B+ tiene una potencia de transmisión máxima de +5 dBm por puerto PON que depende de los módulos SFP GPON que se integran en la OLT.

En la Fig. 49 se puede ver un splitter de primer nivel 1x8 que es instalado en una mufa y la pérdida por empalme en una fusionadora:



Fig. 49. (a) Splitter de primer nivel 1x8 (b) Pérdida en empalme por fusión

3.2.1. Evaluación de la pérdida óptica del usuario más lejano

De acuerdo con los datos de la Tabla 16, la pérdida óptica del usuario más lejano para las tres tecnologías en ambos sentidos, mediante la ecuación (2.2), se tiene:

- Para GPON clase B+:

$$A_{total,1490} = 0.24(1.9) + 0.02(9) + 0.1(3) + 10.38(2) = 21.696 \text{ dB} \quad (3.1)$$

$$A_{total,1310} = 0.35(1.9) + 0.02(9) + 0.1(3) + 10.38(2) = 21.905 \text{ dB} \quad (3.2)$$

- Para XGS-PON clase N2:

$$A_{total,1577} = 0.19(1.9) + 0.02(9) + 0.1(3) + 10.38(2) = 21.601 \text{ dB} \quad (3.3)$$

$$A_{total,1270} = 0.37(1.9) + 0.02(9) + 0.1(3) + 10.38(2) = 21.943 \text{ dB} \quad (3.4)$$

- Para NG-PON2 clase N2 (para los 4 canales):

$$A_{total,1596\sim} = 0.19(1.9) + 0.02(9) + 0.1(3) + 10.38(2) = 21.601 \text{ dB} \quad (3.5)$$

$$A_{total,1532\sim} = 0.21(1.9) + 0.02(9) + 0.1(3) + 10.38(2) = 21.639 \text{ dB} \quad (3.6)$$

Para asegurar una interconexión óptima con los usuarios, es esencial considerar que la pérdida óptica, debe ser inferior a la potencia de sensibilidad de los receptores ópticos, de acuerdo con la ecuación (3.7):

$$P_{rx(sensibilidad)} \leq P_{tx} - A_{total} \quad (3.7)$$

Donde:

$P_{rx(sensibilidad)}$: Potencia mínima de recepción del receptor óptico (ONU) (dBm)

P_{tx} : Potencia máxima del transmisor óptico (OLT) (dBm)

Teniendo en cuenta los valores máximos de potencia de transmisión y sensibilidad de recepción en ambos sentidos, para GPON clase B+, XGS-PON clase N2 y NG-PON2 clase N2, mediante la ecuación (3.7), en la Tabla 17 se obtuvo lo siguiente:

Tabla 17. Comparativo de la pérdida óptica

Tecnología PON		$P_{tx(m\acute{a}x)}$ (dBm)	A_{total} (dB)	$P_{rx(sensibilidad)}$ (dBm)	P_{rx} (dBm)
GPON clase B+	Descendente	~5	~21.696	-28	~-16.696
	Ascendente	~5	~21.905	-28	~-16.905
XGS-PON clase N2	Descendente	~7	~21.601	-28	~-14.601
	Ascendente	~7	~21.943	-28	~-14.943
NG-PON2 clase N2	Descendente	~9	~21.601	-28	~-12.601
	Ascendente	~9	~21.639	-28	~-12.639

Nota: Potencias de transmisión máxima y sensibilidad obtenidas de acuerdo con las recomendaciones ITU-T. [35], [36], [38]

Los resultados de la tabla muestran que las potencias de recepción están por encima de las potencias de sensibilidad establecidas para cada tecnología de acuerdo a sus recomendaciones, lo que asegura un enlace óptimo con el usuario más lejano, bajo las mismas condiciones de la ODN del usuario más lejano.

3.2.2. Evaluación de la dispersión y tiempo de sistema del usuario más lejano

Con los datos de la Tabla 16, se realizó la evaluación de la dispersión total, considerando la dispersión cromática y la dispersión por modo de polarización, ya que la dispersión modal es igual a 0 en fibras monomodo, teniendo en cuenta un ancho espectral de 0.1 nm. Se tiene la **dispersión cromática**, mediante la ecuación (2.4) para:

- GPON clase B+:

$$\Delta t_{crom,1490} = D \cdot \Delta\lambda \cdot L = 14(0.1)(1.9) \cong 2.66 \text{ ps} \quad (3.8)$$

$$\Delta t_{crom,1310} = D \cdot \Delta\lambda \cdot L = 3(0.1)(1.9) \cong 0.57 \text{ ps} \quad (3.9)$$

- XGS-PON clase N2:

$$\Delta t_{crom,1577} = D \cdot \Delta\lambda \cdot L = 18.5(0.1)(1.9) \cong 3.515 \text{ ps} \quad (3.10)$$

$$\Delta t_{crom,1270} = D \cdot \Delta\lambda \cdot L = -3.5(0.1)(1.9) \cong -0.665 \text{ ps} \quad (3.11)$$

- NG-PON2 clase N2 (para los 4 canales):

$$\Delta t_{crom,1594.34\sim} = D \cdot \Delta\lambda \cdot L = 19.5(0.1)(1.9) \cong 3.705 \text{ ps} \quad (3.12)$$

$$\Delta t_{crom,1532\sim} = D \cdot \Delta\lambda \cdot L = 16(0.1)(1.9) \cong 3.04 \text{ ps} \quad (3.13)$$

Y se tiene la **dispersión por modo de polarización**, mediante la ecuación (2.5) para las tres tecnologías:

$$\Delta t_{PMD} = D_{PMD} \sqrt{L} = 0.2\sqrt{1.9} \cong 0.276 \text{ ps} \quad (3.14)$$

Por consiguiente, el **ensanchamiento temporal** total del usuario más lejano mediante la ecuación (2.3) viene dado para:

- GPON clase B+:

$$\Delta t_{total,1490} = \sqrt{(0)^2 + (2.66)^2 + (0.276)^2} \cong 2.66 \text{ ps} \quad (3.15)$$

$$\Delta t_{total,1310} = \sqrt{(0)^2 + (0.57)^2 + (0.276)^2} \cong 0.63 \text{ ps} \quad (3.16)$$

- XGS-PON clase N2:

$$\Delta t_{total,1577} = \sqrt{(0)^2 + (3.515)^2 + (0.276)^2} \cong 3.5151 \text{ ps} \quad (3.17)$$

$$\Delta t_{total,1270} = \sqrt{(0)^2 + (-0.665)^2 + (0.276)^2} \cong 0.72 \text{ ps} \quad (3.18)$$

- NG-PON2 clase N2 (para los 4 canales):

$$\Delta t_{total,1596.34\sim} = \sqrt{(0)^2 + (3.705)^2 + (0.276)^2} \cong 3.7051 \text{ ps} \quad (3.19)$$

$$\Delta t_{total,1532\sim} = \sqrt{(0)^2 + (3.04)^2 + (0.276)^2} \cong 3.053 \text{ ps} \quad (3.20)$$

El ancho espectral de los láseres DFB-CW, por lo general se encuentran en valores menores 0.2 nm (de acuerdo con la Fig. 6), lo que permite que estos láseres sean eficaces en aplicaciones donde se asegure la estabilidad de la longitud de onda y se minimice la dispersión cromática, para aplicaciones en redes PON, por lo que, este efecto tiene un impacto mínimo para el enlace del usuario más lejano y en general de toda la red, no siendo un factor limitante en el rendimiento, al utilizar este tipo de láseres y por las distancias cortas entre los usuarios y el transmisor. El desempeño del rendimiento en enlace se centra más en otros factores como la potencia del transmisor, las pérdidas en la fibra y la sensibilidad del receptor.

Otro aspecto importante a evaluar es el **tiempo del sistema**, que estima el ensanchamiento total del pulso en comunicaciones ópticas y es crucial para determinar la calidad de transmisión del sistema. Esto se realiza mediante una fórmula que integra los diferentes efectos de dispersión, así como el tiempo de subida de bit del transmisor y receptor:

$$t_{sys} = \sqrt{t_{tx}^2 + t_{rx}^2 + \Delta t_{chrom}^2 + \Delta t_{PMD}^2} \quad (3.21)$$

Donde:

t_{sys} : Tiempo del sistema (ps)

t_{tx} : Tiempo de subida del transmisor (ps)

t_{rx} : Tiempo de subida del receptor (ps)

En el contexto de sistemas PON, los tiempos de subida están limitados por la velocidad de transmisión del sistema y la capacidad del receptor para interpretar correctamente los datos. Por lo que se especifican ciertos valores típicos de tiempos de subida. Estos deben ser mucho menores que el tiempo de bit para evitar distorsiones significativas en la señal. De acuerdo con los datos extraídos de fichas técnicas e investigaciones, el tiempo de subida máximo tanto para transmisor como receptor, es menor al 35 % del tiempo de bit, por lo que pueden variar desde los 20 ps hasta 140 ps para GPON y desde 5 ps hasta 35 ps en tecnologías de 10 Gbps como XGS-PON [7], [12]. Considerando los valores máximos de subida en el transmisor y receptor de cada tecnología y utilizando los resultados de la ecuación (3.15) a la (3.20), se tiene el tiempo del sistema para cada tecnología mediante la ecuación (3.21), en sentido descendente y ascendente:

- GPON clase B+:

$$t_{sys,1490} = \sqrt{(140)^2 + (140)^2 + (2.66)^2 + (0.276)^2} \cong 198.008 \text{ ps} \quad (3.22)$$

$$t_{sys,1310} = \sqrt{(280)^2 + (280)^2 + (0.57)^2 + (0.276)^2} \cong 398.98 \text{ ps} \quad (3.23)$$

- XGS-PON clase N2:

$$t_{sys,1577} = \sqrt{(35)^2 + (35)^2 + (3.515)^2 + (0.276)^2} \cong 49.62 \text{ ps} \quad (3.24)$$

$$t_{sys,1270} = \sqrt{(35)^2 + (35)^2 + (-0.665)^2 + (0.276)^2} \cong 49.5 \text{ ps} \quad (3.25)$$

- NG-PON2 clase N2 (para los 4 canales):

$$t_{sys,1596.34\sim} = \sqrt{(35)^2 + (35)^2 + (3.705)^2 + (0.276)^2} \cong 49.63 \text{ ps} \quad (3.26)$$

$$t_{sys,1532\sim} = \sqrt{(35)^2 + (35)^2 + (3.04)^2 + (0.276)^2} \cong 49.59 \text{ ps} \quad (3.27)$$

El t_{sys} debe ser menor al 70 % del tiempo de bit para códigos de línea NRZ (código de línea utilizada en tecnologías PON). Realizando una comparación con los resultados anteriores y considerando que el tiempo de bit de XGS-PON y NG-PON2 son iguales en ambos sentidos (debido a sus tasas simétricas de transmisión), en la Tabla 18 se tiene lo siguiente:

Tabla 18. Comparativo de la dispersión y tiempo de sistema

Tecnología PON		Δt_{total} (ps)	t_{sys} (ps)	T_{bit} (ps)	$0.7T_{bit}$ (ps)
GPON clase B+	Descendente	~2.66	~198.008	~400	280
	Ascendente	~0.63	~398.98	~800	560
XGS-PON clase N2	Descendente	~3.5151	~49.62	~100	70
	Ascendente	~0.72	~49.5	~100	70
NG-PON2 clase N2	Descendente	~3.7051	~49.63	~100	70
	Ascendente	~3.053	~49.59	~100	70

Estos resultados confirman que el tiempo del sistema (t_{sys}) en sentido descendente y ascendente de cada tecnología, opera por debajo del margen recomendado para el código de línea NRZ, incluso considerando tiempos de subida máximo del transmisor y receptor de acuerdo con los datos

obtenidos y que para aspectos de diseño no deben superar estos valores, por lo que así se asegura un enlace óptimo para redes PON, y en concreto para el usuario más lejano de la red.

3.2.3. Evaluación del Factor Q y BER a partir de la relación señal a ruido óptico

Para un receptor óptico, el Factor Q está influenciado por varios parámetros como la relación señal a ruido óptico (OSNR), el ancho de banda óptico y el ancho de banda eléctrico. Aunque no existe una fórmula directa y única que relacione explícitamente estos factores en todos los casos, el Factor Q en sistemas de comunicaciones ópticas se puede aproximar considerando la contribución del ruido óptico, el ruido eléctrico y las características del receptor [50]. La ecuación (3.28), que relaciona estos parámetros es la siguiente:

$$Q = \sqrt{OSNR (lineal) \cdot \frac{B_o}{B_E}} \quad (3.28)$$

$$OSNR (dB) = P_{rx}(dBm) - P_{ruido}(dBm) \quad (3.29)$$

$$OSNR (lineal) = 10^{\frac{OSNR (dB)}{10}} \quad (3.30)$$

Donde:

$OSNR$: Relación señal a ruido óptico.

B_o : Ancho de banda óptico del fotodetector.

B_e : Ancho de banda eléctrico del receptor.

Para evaluar el Factor Q y la OSNR, por lo general se considera una OSNR típicamente mayor a 20 dB, con niveles de potencia de ruido entre -40 dBm a -45 dBm, y considerando también que la OSNR de las PON de nueva generación, debe ser mayor a la de GPON, lo que implica una mayor potencia de recepción y una menor potencia de ruido, para asegurar un buen rendimiento a altas tasas de transmisión. Se tomó el ancho de banda óptico del fotodetector (véase anexos G y E) correspondiente a cada tecnología, así mismo el ancho de banda eléctrico del receptor requerido,

que debe ser por lo menos la mitad de la tasa máxima de transmisión [51]. En cuanto a las potencias de recepción, se tomará en cuenta los obtenidos en las ecuaciones (3.1), (3.3) y (3.5) en sentido descendente. En la Tabla 19 se observa los resultados obtenidos utilizando las ecuaciones (3.28), (3.29) y (3.30):

Tabla 19. Factor Q a partir de la OSNR y características del receptor de cada tecnología

Parámetros	GPON clase B+	XGS-PON clase N2	NG-PON2 clase N2
P_{rx} (dBm)	-16.696	-14.601	-12.601
P_{ruido} (dBm)	~-42	~-45	~-45
OSNR (dB)	25.304	30.399	32.399
OSNR (lineal)	339.1564	1096.2257	1737.4
B_O (GHz)	~2.8	~8.8	~8.8
B_E (GHz)	~1.25	~5	~5
Q	27.562	43.9244	55.2976
BER	1.589E-167	0	0

De acuerdo con estos resultados, se pudo estimar que el Factor Q en XGS-PON y NG-PON2 es de 43.9244 y 55.2976 respectivamente, con una BER de 0 en comparación a GPON, estimando un Factor Q de 27.562 y una BER de 1.589E-167. Por lo que esto indica que las PON de nueva generación superan en rendimiento a GPON, de acuerdo a las potencias de recepción obtenidas bajo las mismas condiciones de la ODN del usuario más lejano.

Un aspecto importante a mencionar es que, para lograr una estimación más acertada del Factor Q mediante este método, es necesario considerar otros efectos de degradación de la señal óptica como la dispersión y otros efectos no lineales que inciden directamente en los valores de la OSNR, así como la obtención de los valores típicos de potencia de ruido en tecnologías PON. Para estimar los niveles de potencia de ruido con mayor precisión, se utilizan analizadores de espectro óptico (OSA).

3.2.4. Evaluación de las capacidades y escalabilidad

Se evaluó las capacidades de cada tecnología en base a la tasa de datos en descarga y subida; y relaciones de división considerando 1:64 y 1:128, como se observa en la Tabla 20:

Tabla 20. Evaluación de capacidades y escalabilidad

Características		GPON clase B+		XGS-PON clase N2		NG-PON2 clase N2	
Capacidad total de descarga (Gbps)		2.488		9.95328		~10 por longitud de onda (hasta ~40 usando 4 longitudes de onda)	
Capacidad total de subida (Gbps)		1.244		9.95328		~10 por longitud de onda (hasta ~40 usando 4 longitudes de onda)	
Relación de división		1:64	1:128	1:64	1:128	1:64	1:128
Tasa de datos por usuario	Descarga (Mbps)	38.88	19.44	156.26	78.13	156.26 (con un canal) / 625.04 (con 4 canales)	78.13 (con un canal) / 312.52 (con 4 canales)
	Subida (Mbps)	19.44	9.72	156.26	78.13	156.26 (con un canal) / 625.04 (con 4 canales)	78.13 (con un canal) / 312.52 (con 4 canales)

La comparación entre GPON, XGS-PON y NG-PON2 revela un claro avance en las capacidades de transmisión a medida que la tecnología progresa, con XGS-PON y NG-PON2 dando un salto significativo en términos de velocidad y escalabilidad. El uso de mayores relaciones de división en estas tecnologías más avanzadas como 1:128, permite conectar más usuarios por cada puerto de la OLT sin comprometer significativamente la velocidad individual. Esto hace que XGS-PON y NG-PON2 sean soluciones más eficientes y escalables para entornos con alta densidad de usuarios.

Para concluir que tipo de tecnología se adecua mejor según a las necesidades del consumo de ancho de banda, en la Tabla 21 se puede observar algunas de las actividades y su consumo:

Tabla 21. Actividades principales y su consumo de datos

Actividad	Consumo promedio	Residencial	Empresarial
Videoconferencias en 4K/8K	15 - 25 Mbps (4K) / 50 - 80 Mbps (8K)	Poco uso	Uso frecuente
Streaming de video 4K/8K	15 - 25 Mbps (HD) / 50 - 80 Mbps (4K)	Uso frecuente en entretenimiento	Uso menos común, relevante en presentaciones multimedia
Aplicaciones en la nube	5 - 10 Mbps	Poco uso	Uso intensivo, especialmente para colaboración y almacenamiento
Juegos en Línea	3 - 6 Mbps	Uso frecuente	Uso poco común, excepto en sectores específicos (e-sports, desarrollo de juegos)
Transferencia de Archivos Grandes	Variable, puede superar 100 Mbps	Moderado, principalmente para descargas de juegos o contenido multimedia	Uso frecuente, especialmente en diseño, documentación y aplicaciones multimedia
Dispositivos Conectados	-	Varios dispositivos domésticos	Múltiples dispositivos de trabajo
Requerimientos de Conectividad	-	Alta velocidad, menor capacidad	Alta velocidad, gran capacidad y redundancia

De acuerdo con lo anterior se puede decir que:

- GPON ofrecería suficiente capacidad para muchas aplicaciones de banda ancha, pero su límite de ancho de banda lo hace menos adecuado para aplicaciones futuras que requieren más capacidad.
- XGS-PON ofrecería una mejora significativa en la capacidad. Esto lo hace ideal para soportar aplicaciones de alta demanda de ancho de banda, como servicios 4K/8K, múltiples dispositivos de trabajo, servicios empresariales, entre otros.
- NG-PON2 ofrecería la mayor escalabilidad y flexibilidad, ya que permite la utilización de múltiples longitudes de onda para aumentar la capacidad total. Es la opción más avanzada y está orientada a futuros despliegues que requieren un gran ancho de banda y la capacidad de adaptarse a la demanda.

La elección entre estas tecnologías dependerá de las necesidades de la capacidad, la previsión de crecimiento futuro y el presupuesto disponible para el despliegue, que pueden variar según la demanda del ancho de banda de una zona determinada. Para el caso concreto del Centro Histórico de Cusco, sería necesario un estudio de mercado.

CAPITULO IV: SIMULACIÓN DE LAS REDES PON

4.1. Software de simulación

Existen varios softwares de simulación que nos permiten analizar sistemas ópticos, por lo que para esta investigación se hizo uso de Optisystem, para la evaluación del rendimiento de las redes PON. Este software de alto nivel brinda un entorno de simulación de múltiples componentes y sistemas ópticos. Permite que el usuario disponga de agregar componentes basados en bibliotecas, bloques, subsistemas personalizados y también realizar una simulación conjunta con softwares como Matlab [52].



Fig. 50. Software Optisystem v7 [52]

Optisystem ofrece al usuario de una amplia gama de herramientas para ingeniería de diseño en sistemas y comunicaciones ópticas, lo que permite una simulación detallada y una alta precisión. También permite probar y optimizar prácticamente cualquier tipo de canal óptico en la capa física de una amplia variedad de redes ópticas, sistemas de radiodifusión de vídeo analógico o redes troncales intercontinentales [52]. En la Fig. 51 se puede observar el entorno de simulación de Optisystem:

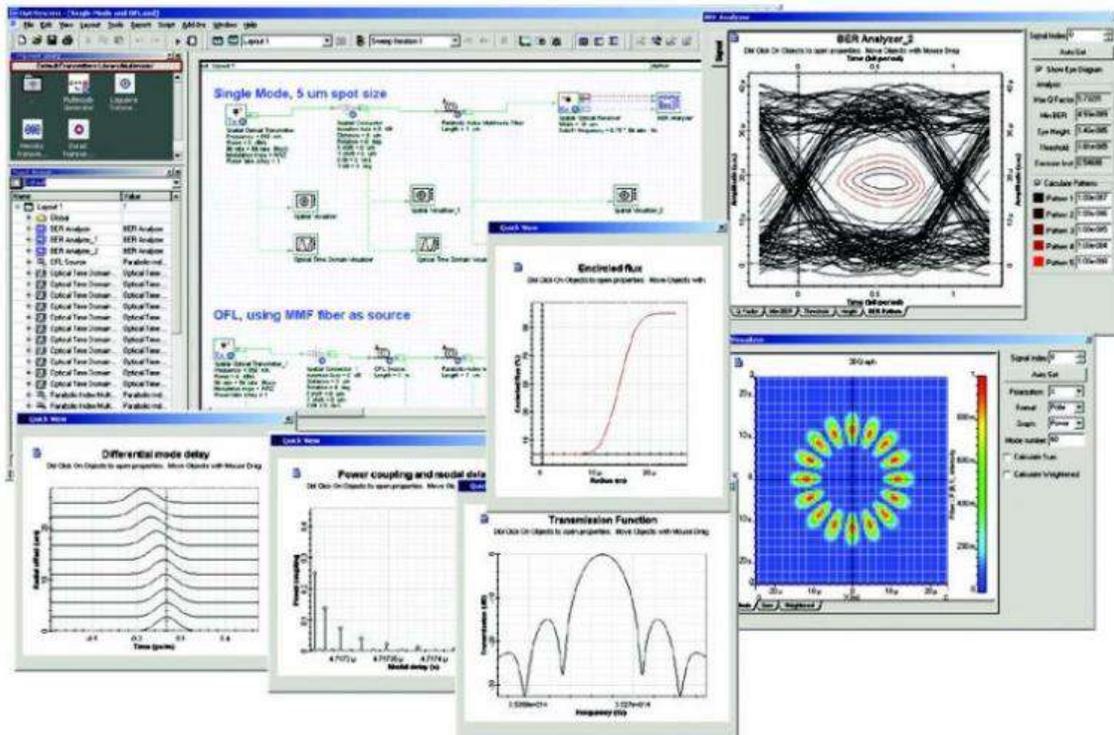


Fig. 51. Interfaz gráfica de Optisystem [52]

Para la evaluación del rendimiento de sistemas ópticos, este software permite el cálculo de parámetros como el Factor Q y la tasa de error de bit (BER), mediante el análisis numérico o técnicas semianalíticas en sistemas afectados por el ruido e interferencia entre símbolos [52].

Entre las principales herramientas para el análisis del rendimiento que se puede obtener con Optisystem se tiene:

- Diagrama de ojo.
- Factor Q.
- Tasa de error de bit (BER).
- Potencia de señal.
- Analizador de espectro óptico, etc. [52]

4.2. Desarrollo de la simulación

Para realizar la simulación de las redes, se tomó en cuenta la misma ODN, como los componentes y elementos ópticos pasivos que la conforman, que fueron descritas en el capítulo anterior, puesto que fue común en la simulación de las tres tecnologías, con la diferencia de los elementos y parámetros ópticos de transmisión y recepción propias de cada tecnología. El desarrollo de simulación, fue de la siguiente manera:

- Primero se realizó la simulación de la red GPON implementada, con los datos obtenidos de la ODN del usuario más lejano del apartado 3.6; y de acuerdo a la recomendación ITU-T G.984.2 clase B+ de transmisión de un puerto SFP de la OLT, teniendo en cuenta el tipo de láser, la potencia de transmisión, así como la potencia recepción, el tipo de filtro y fotodetector utilizado en esta tecnología.
- En la segunda parte se realizó la simulación de la red XGS-PON de acuerdo con la recomendación ITU-T G.9807 y la Tabla 5, considerando la clase N2 con sus respectivos parámetros de transmisión y recepción en sentido descendente.
- En la tercera parte se realizó la simulación de la red NG-PON2 de acuerdo con la recomendación ITU-T G.989 y la Tabla 9, considerando la clase N2 con sus respectivos parámetros de transmisión y recepción en sentido descendente.

Una razón importante a mencionar es que la simulación de las redes se realizó teniendo en cuenta el usuario más lejano de la red GPON, bajo las mismas condiciones de la ODN descritas en el apartado 3.6. Esta consideración es fundamental debido a que el usuario más lejano, es el que experimenta mayores efectos de atenuación y dispersión de señal, para así garantizar una interconectividad óptima y una calidad de servicio adecuada con los demás usuarios que se encuentran más cerca al transmisor, asegurando un rendimiento confiable.

Para simular y evaluar el rendimiento de las tres tecnologías, también se verificó que la ODN actual, presenta un despliegue e instalación que puede variar al transcurrir el tiempo, esto debido a que cada cierto tiempo, se llega a dar un mantenimiento y ciertas modificaciones para mantener la ODN de la red en óptimas condiciones, influyendo en la pérdida óptica desde el

transmisor y las potencias de recepción descendente, que fueron medidas en las cajas de distribución en los puntos descritos, pero que se encuentran dentro de los rangos permitidos para la tecnología GPON clase B+.

En la Fig. 52 se observa la ODN general implementada en Optisystem del usuario más lejano, que será común para la simulación de las tres tecnologías:

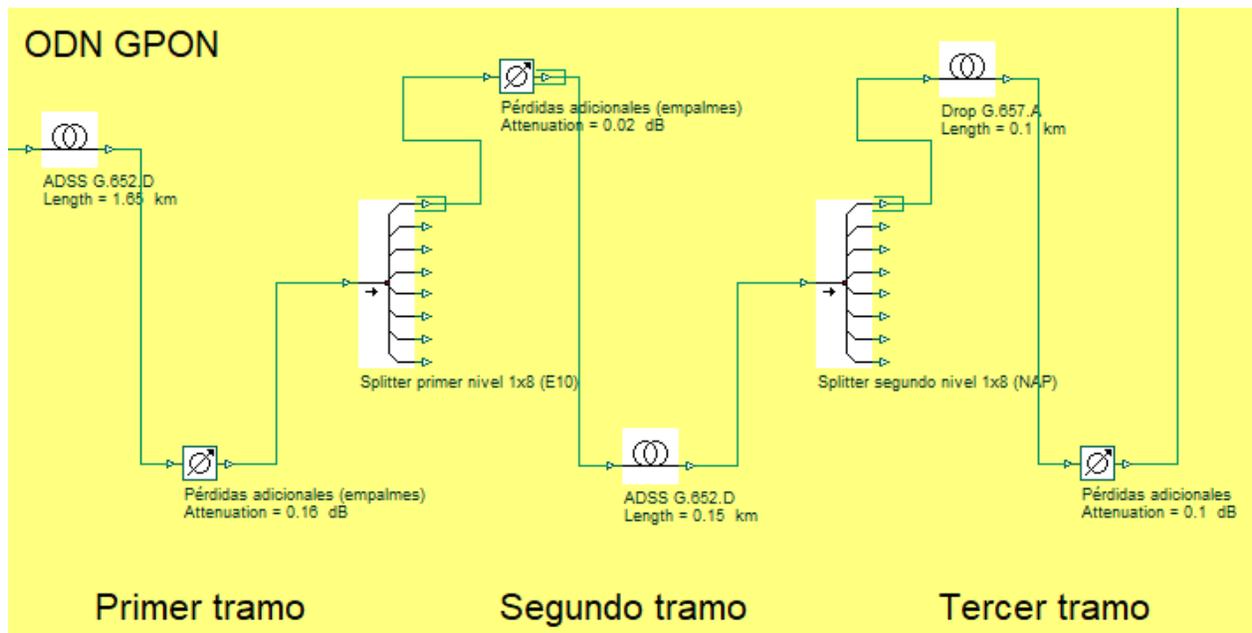


Fig. 52. Representación de la ODN del usuario más lejano en Optisystem

Se puede observar que el primer tramo, inicia con la extensión del hilo de fibra ADSS G.652.D saliente desde el nodo transmisor hasta el splitter de primer nivel de 1x8 que se encuentra en la derivación E10 con una distancia aproximada de 1.65 km, incluyendo las pérdidas totales por empalmes con un atenuador óptico configurado a 0.16 dB; y la pérdida por distancia del primer tramo, que posteriormente se configuró con los parámetros característicos como la atenuación por longitud de onda y dispersión de cada tecnología. De la misma manera, en el segundo tramo, de una de las salidas del splitter de primer nivel hasta el splitter de segundo nivel o caja de distribución, representa el hilo de fibra ADSS G.652.D correspondiente a esta caja de distribución con una distancia de 150 m aproximadamente incluyendo una pérdida por empalme con un atenuador configurado a 0.02 dB; y por último, en el tercer tramo, de la salida del splitter de segundo nivel

hasta el usuario final, representa el hilo de fibra del cable de acometida o drop G.657.A con una distancia promedio de 100 m, antes de la conexión con la ONU, donde se incluye un atenuador que representa una pérdida por conector de 0.1 dB adicional. También se configuró ambos splitters de 1x8 de con una pérdida de 9.03 dB por defecto, agregando un 1.35 dB obteniendo 10.38 dB para una aproximación de pérdida promedio de un splitter real (véase anexo A). En cuanto a la atenuación por distancia y los diferentes tipos de dispersión, que dependen de la longitud de onda de operación, fueron configurados de acuerdo a la hoja de datos de la fibra G.652.D (véase anexo B).

Cabe mencionar, que la implementación y configuración de la ODN en el simulador, se hizo considerando algunos parámetros por defecto, tomando en cuenta los parámetros más relevantes que influyen en la transmisión.

4.2.1. Simulación de la red GPON

Para la implementación y simulación de la red GPON, primeramente, se creó el bloque de transmisión, concretamente con la representación de un puerto PON SFP GPON clase B+, de acuerdo a los bloques que representan a este, como en las investigaciones mencionadas [7], [9]; considerando también los parámetros y variables relevantes con los datos obtenidos de la Tabla 3, para su configuración. Así mismo, se realizó la creación del receptor óptico, concretamente en la etapa de fotodetección de una ONU del usuario más lejano, considerando los elementos que la constituyen, como los filtros y el tipo de fotodetector, de acuerdo con la información que se obtuvo de las investigaciones mencionadas [6], [7] y realizando también la configuración de sus parámetros con una hoja de datos de referencia, del tipo de fotodetector utilizado en esta tecnología, como lo son la ganancia y la capacidad de respuesta [53] (véase anexo E y F). También se colocaron equipos de medición, analizadores y visualizadores, con el propósito de verificar el recorrido de la señal óptica desde la salida de la OLT, las pérdidas ópticas a través de la ODN, hasta la potencia de recepción a la entrada del receptor óptico ONU.

- **Bloque del puerto GPON de la Terminal de línea óptica (OLT):** Para la implementación general de un puerto PON de la OLT que transmite la señal óptica, primeramente, se creó la

etapa que representa al módulo SFP GPON clase B+ que alimenta a las cajas de distribución y abonados más lejanos, para ello se utilizó un láser de onda continua (CW láser), que fue configurado con una potencia de transmisión de valor 8 dBm a una longitud de onda de 1490 nm y ancho de línea de 10 MHz; un modulador Mach-Zehnder encargado de convertir la señal que proviene del circuito eléctrico de la OLT a una señal óptica una tasa de extinción de 8.2 dB en el modulador; así mismo, se creó la etapa eléctrica del transmisor, utilizando primero un generador de secuencia de bits pseudoaleatorio (PRBSG) de 1 y 0 lógicos, configurado con una tasa de transmisión de 2.5 Gbps, que fue conectado a un codificador o generador de pulso NRZ, para convertirlos en una señal eléctrica, y ser acoplado al modulador Mach-Zehnder; finalmente un conector con una pérdida de 0.1 dB que representa la pérdida del ODF. En la Fig. 53, se muestra el bloque que representa el puerto GPON de la OLT:

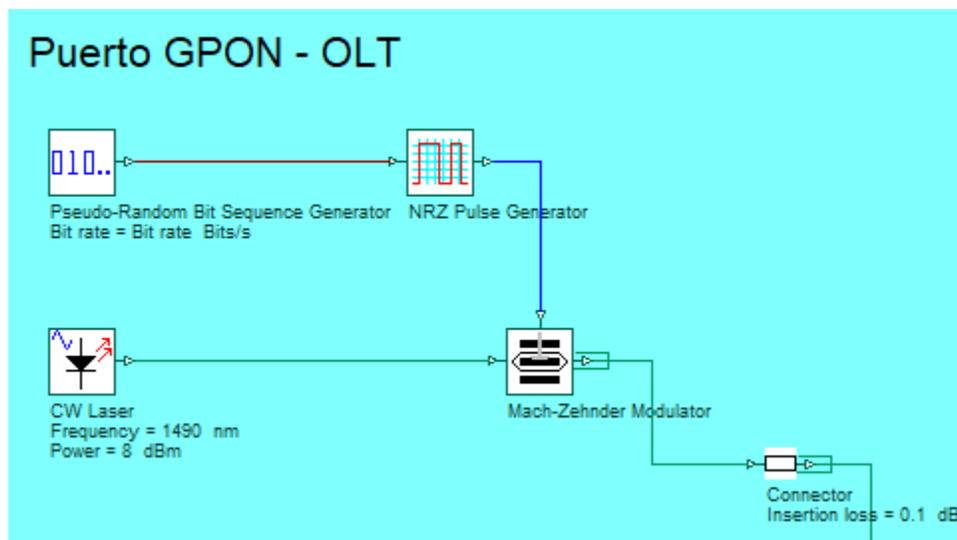


Fig. 53. Bloque del puerto GPON clase B+.

La potencia del láser de onda continua, se configuró un valor de 8 dBm, debido a que al ser conectado al modulador MZ se tiene una pérdida aproximada de 3.2 dB (pérdida inherente que se produce en el modulador) para obtener un valor de 4.888 dBm de potencia de salida, considerando también que la potencia máxima de salida de un SFP GPON clase B+ en buenas condiciones ronda los 4.5 a 5 dBm, por lo que la potencia de salida del puerto GPON, se acerca a la potencia medida en los datos obtenidos descritos del apartado 3.3. En las siguientes figuras, se puede observar las configuraciones necesarias que se realizaron para simular el puerto

GPON de la OLT hasta el usuario más lejano, así como la visualización de la potencia de salida, y la forma de la señal de salida en el dominio del tiempo y frecuencia:

Label: Cost\$:

Main | Polarization | Simulation | Noise | Random numbers

Disp	Name	Value	Units	Mode
<input checked="" type="checkbox"/>	Frequency	1490	nm	Normal
<input checked="" type="checkbox"/>	Power	8	dBm	Normal
<input type="checkbox"/>	Linewidth	10	MHz	Normal
<input type="checkbox"/>	Initial phase	0	deg	Normal

Label:

Simulation | Signals | Spatial effects | Noise | Signal tracing

Name	Value	Units	Mode
Simulation window	Set bit rate		Normal
Reference bit rate	<input checked="" type="checkbox"/>		Normal
Bit rate	2500000000	Bits/s	Normal
Time window	5.12e-008	s	Normal
Sample rate	160000000000	Hz	Normal
Sequence length	128	Bits	Normal
Samples per bit	64		Normal
Number of samples	8192		Normal

Label: Cost\$:

Main | Simulation

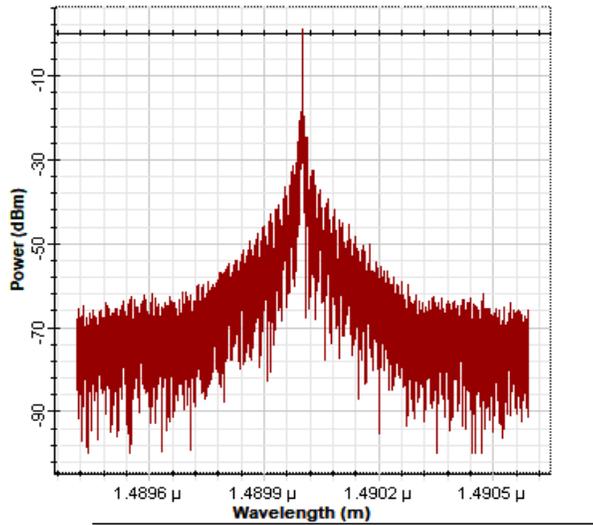
Disp	Name	Value	Units	Mode
<input type="checkbox"/>	Extinction ratio	8.2	dB	Normal
<input type="checkbox"/>	Negative signal chirp	<input type="checkbox"/>		Normal
<input type="checkbox"/>	Symmetry factor	-1		Normal

Fig. 54. Configuraciones realizadas en el bloque del puerto GPON

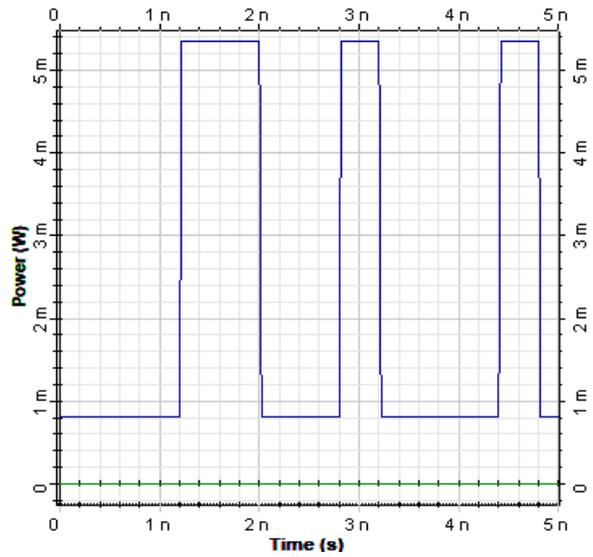
Se puede observar también en las siguientes figuras la potencia medida en la salida que representa el ODF, el espectro de la señal y la señal de salida en el tiempo:



(a)



(b)



(c)

Fig. 55. (a) Potencia de salida en el ODF (b) Espectro de la señal de salida (c) Señal de salida (GPON)

- Bloque de la red de distribución óptica (ODN) de la red GPON:** En la ODN se configuró el hilo de fibra en cada tramo, con su distancia respectiva y los parámetros correspondientes a la longitud de onda de referencia de 1490 nm del usuario más lejano, como la pérdida por distancia de 0.24 dB/km, dispersión cromática de 14 ps/nm/km y dispersión por modo de polarización de $0.2 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$; así mismo la atenuación en los splitters de primer nivel (mufa) de 1x8 y segundo nivel (caja NAP) de 1x8 con 10.38 dB en cada uno; y finalmente agregando un atenuador óptico en cada tramo, para simular las pérdidas adicionales por inserción y empalmes. En la Fig. 56, se observa la ODN de referencia del usuario más lejano para la red GPON:

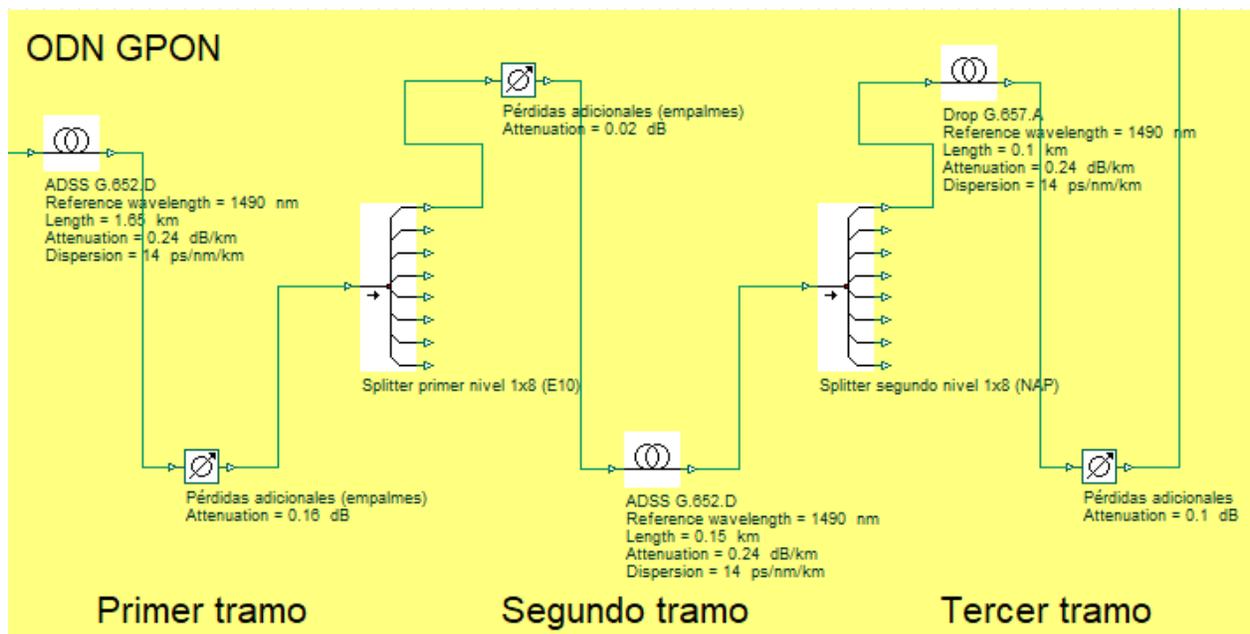


Fig. 56. ODN para GPON.

En las siguientes figuras se observan las configuraciones realizadas y la potencia recibida en el splitter de segundo nivel:

Label: Cost\$:

Main | Disp... | PMD | Nonl... | Num... | Gr... | Simu... | Noise | Rand...

Disp	Name	Value	Units	Mode
<input type="checkbox"/>	User defined reference w	<input checked="" type="checkbox"/>		Normal
<input checked="" type="checkbox"/>	Reference wavelength	1490	nm	Normal
<input checked="" type="checkbox"/>	Length	1.65	km	Normal
<input type="checkbox"/>	Attenuation effect	<input checked="" type="checkbox"/>		Normal
<input type="checkbox"/>	Attenuation data type	Constant		Normal
<input checked="" type="checkbox"/>	Attenuation	0.24	dB/km	Normal
<input type="checkbox"/>	Attenuation vs. wavelengt	Attenuation.dat		Normal

Label: Cost\$:

Main | **Disp...** | PMD | Nonl... | Num... | Gr... | Simu... | Noise | Rand...

Disp	Name	Value	Units	Mode
<input type="checkbox"/>	Group velocity dispersion	<input checked="" type="checkbox"/>		Normal
<input type="checkbox"/>	Third-order dispersion	<input checked="" type="checkbox"/>		Normal
<input type="checkbox"/>	Dispersion data type	Constant		Normal
<input type="checkbox"/>	Frequency domain param	<input type="checkbox"/>		Normal
<input checked="" type="checkbox"/>	Dispersion	14	ps/nm/km	Normal
<input type="checkbox"/>	Dispersion slope	0.075	ps/nm ² /k	Normal

Label: Cost\$:

Main | **Simulation**

Disp	Name	Value	Units	Mode
<input checked="" type="checkbox"/>	Attenuation	0.16	dB	Normal

Fig. 57. Configuraciones realizadas para la ODN GPON

Se puede observar, la potencia en el splitter de segundo nivel:



Fig. 58. Potencia medida en el splitter de segundo nivel

- **Bloque de la unidad de red óptica ONU GPON:** Para la implementación de la ONU, se realizó a partir de la conexión mediante el conector rápido, la etapa de filtración y la etapa de fotodetección mediante un receptor óptico, para ello se hizo uso de un conector con una pérdida de 0.1 dB; un filtro pasabanda de Bessel de segundo orden, con un ancho de banda de 10 GHz centralizado en 1490 nm (201.2 THz); un fotodetector del tipo APD con una ganancia de 1, capacidad de respuesta de 0.95 A/W y corriente de oscuridad 50 nA (esto de acuerdo a la hoja de datos que se obtuvo de los fotodetectores usados en los receptores ópticos GPON) y por último configurando un filtro pasabajo, que viene integrado en el receptor óptico. En la Fig. 59, se puede observar el bloque que representa la ONU:

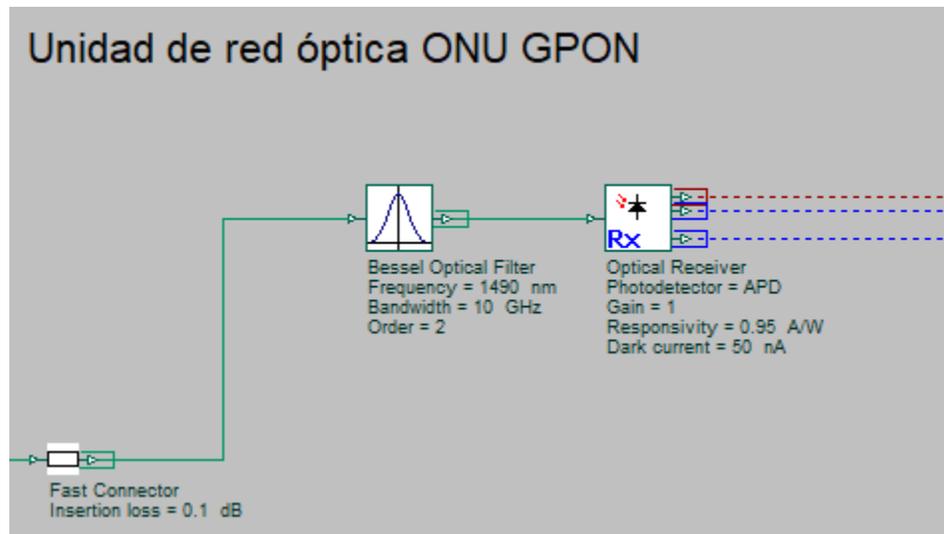


Fig. 59. Bloque de la unidad de red óptica GPON

En la siguiente figura se muestran las configuraciones que se hicieron en el bloque de unidad de red óptica GPON:

Label: Cost\$:

Main | Simulation | Noise

Disp	Name	Value	Units	Mode
<input checked="" type="checkbox"/>	Frequency	1490	nm	Normal
<input checked="" type="checkbox"/>	Bandwidth	10	GHz	Normal
<input type="checkbox"/>	Insertion loss	0	dB	Normal
<input type="checkbox"/>	Depth	100	dB	Normal
<input checked="" type="checkbox"/>	Order	2		Normal

Label: Cost\$:

Main | Low Pass ... | 3R Regen... | Downsam... | Noise | Random n...

Disp	Name	Value	Units	Mode
<input checked="" type="checkbox"/>	Photodetector	APD		Normal
<input checked="" type="checkbox"/>	Gain	1		Normal
<input type="checkbox"/>	Ionization ratio	0.9		Normal
<input checked="" type="checkbox"/>	Responsivity	0.95	A/W	Normal
<input checked="" type="checkbox"/>	Dark current	50	nA	Normal

Label: Cost\$:

Main | Simulation

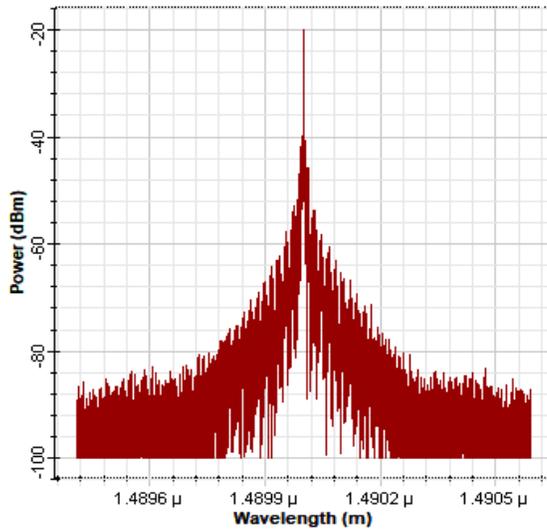
Disp	Name	Value	Units	Mode
<input checked="" type="checkbox"/>	Insertion loss	0.1	dB	Normal

Fig. 60. Configuraciones realizadas en el bloque ONU GPON

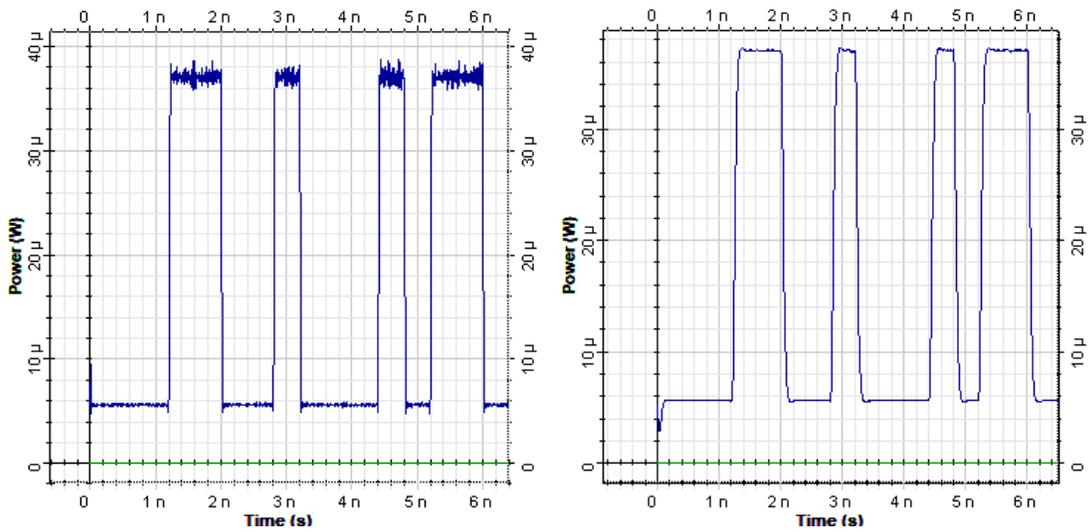
Con estos parámetros configurados, se obtuvo los siguientes resultados:



(a)



(b)



(c)

Fig. 61. (a) Potencia de recepción (b) Espectro (c) Señal recibida y señal filtrada (GPON)

4.2.2. Simulación de la red XGS-PON

Para la implementación y simulación de la red XGS-PON, primeramente, se creó el transmisor, con la representación de un puerto PON SFP XGS-PON clase N2 de la OLT, de acuerdo con el bloque que representa a este, como en los trabajos investigación mencionados [7], considerando también la Tabla 5; y los parámetros relevantes con una hoja de datos de los elementos y equipos descritos anteriormente, para su configuración [54] (véase anexo H). Así mismo, se realizó la creación del receptor óptico o unidad de red óptica, concretamente en la etapa de fotodetección de la ONU del usuario más lejano, considerando los elementos que la constituyen como los filtros y el tipo de fotodetector, de acuerdo con la información que se obtuvo de la investigación [7] y realizando la configuración de sus parámetros más relevantes con la hoja de datos del tipo de fotodetector utilizado en esta tecnología, como lo son la ganancia y la capacidad de respuesta [55], [56] (véase anexo G y H). También se colocaron equipos de medición, analizadores y visualizadores, con el propósito de verificar el recorrido de la señal óptica desde la salida de la OLT, las pérdidas ópticas a través de la ODN, hasta la potencia de recepción a la entrada del receptor óptico ONU.

- **Bloque del puerto XGS-PON de la Terminal de línea óptica (OLT):** Se utilizó un láser de onda continua (CW láser), configurado con una potencia de salida de 10 dBm a una longitud de onda de 1577 nm para obtener una potencia modulada de 6.888 dBm y ancho de línea de 10 MHz; un modulador Mach-Zehnder encargado de convertir la señal que proviene del circuito eléctrico de la OLT a una señal óptica, configurado con una tasa de extinción de 8.2 dB; seguidamente, se creó la etapa eléctrica del transmisor, utilizando primero un generador de secuencia de bits pseudoaleatorio (PRBSG) de 1 y 0 lógicos, configurado con una tasa de transmisión de 10 Gbps, que fue conectado a un codificador o generador de pulso NRZ para convertirlos en una señal eléctrica, y ser acoplado al modulador Mach-Zehnder; y finalmente un conector con una pérdida de 0.1 dB que representa la pérdida del ODF y otros elementos de interconexión. En la Fig. 62, se muestra el bloque que representa el puerto XGS-PON de la OLT:

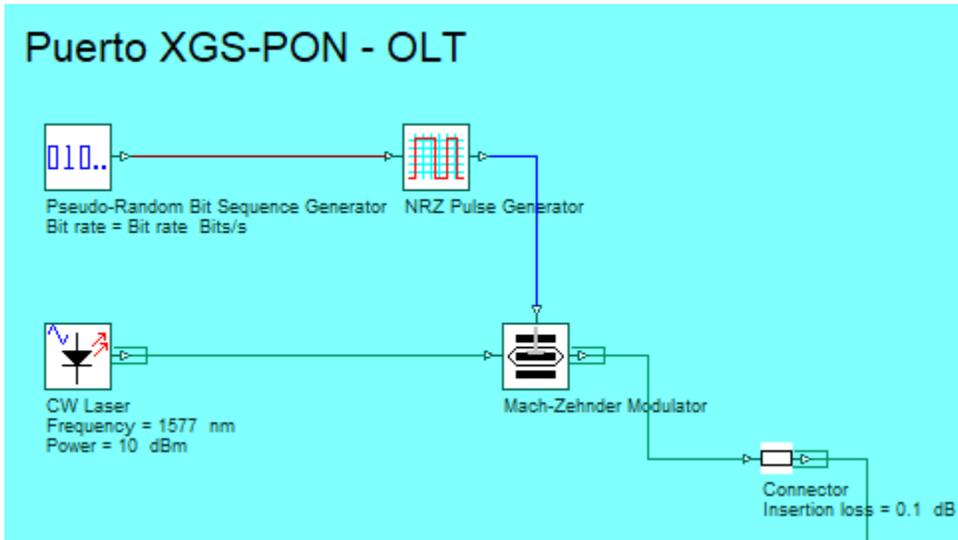


Fig. 62. Bloque del puerto XGS-PON clase N2

En las siguientes figuras, se puede observar las configuraciones necesarias que se realizaron para simular el puerto XGS-PON de la OLT, así como la visualización de la potencia de salida que representa la salida del ODF, y la forma de la señal de salida en el dominio del tiempo y frecuencia:

Label: Cost\$:

Main | Polarization | Simulation | Noise | Random numbers

Disp	Name	Value	Units	Mode
<input checked="" type="checkbox"/>	Frequency	1577	nm	Normal
<input checked="" type="checkbox"/>	Power	10	dBm	Normal
<input type="checkbox"/>	Linewidth	10	MHz	Normal
<input type="checkbox"/>	Initial phase	0	deg	Normal

Label:

Simulation | Signals | Spatial effects | Noise | Signal tracing

Name	Value	Units	Mode
Simulation window	Set bit rate		Normal
Reference bit rate	<input checked="" type="checkbox"/>		Normal
Bit rate	10000000000	Bits/s	Normal
Time window	1.28e-008	s	Normal
Sample rate	640000000000	Hz	Normal
Sequence length	128	Bits	Normal
Samples per bit	64		Normal
Number of samples	8192		Normal

Label: Cost\$:

Main | Simulation

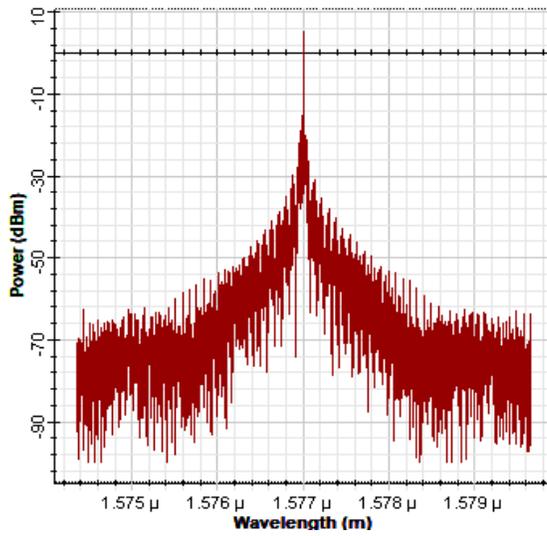
Disp	Name	Value	Units	Mode
<input type="checkbox"/>	Extinction ratio	8.2	dB	Normal
<input type="checkbox"/>	Negative signal chirp	<input type="checkbox"/>		Normal
<input type="checkbox"/>	Symmetry factor	-1		Normal

Fig. 63. Configuraciones realizadas en el puerto XGS-PON

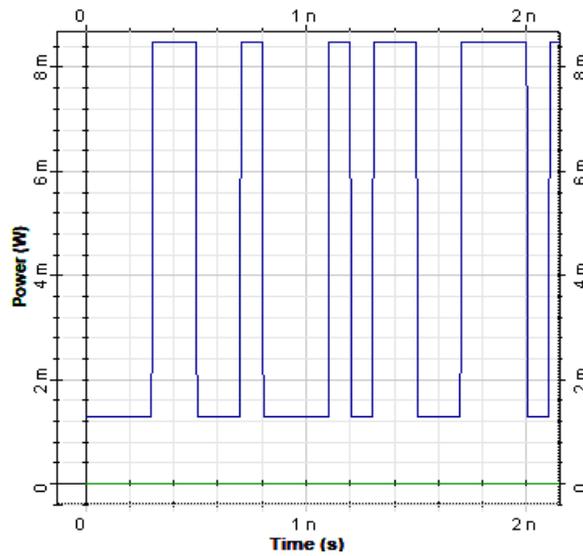
En las siguientes figuras también observa la potencia medida en la salida que representa el ODF, el espectro de la señal y la señal de salida en el tiempo:



(a)



(b)



(c)

Fig. 64. (a) Potencia de salida en el ODF (b) Espectro de la señal de salida (c) Señal de salida (XGS-PON)

- Bloque de la red de distribución óptica (ODN) de la red XGS-PON:** En la ODN se configuró el hilo de fibra en cada tramo, con su distancia respectiva y los parámetros correspondientes a la longitud de onda de referencia de 1577 nm del usuario más lejano, como la pérdida por distancia de 0.19 dB/km, dispersión cromática de 18.5 ps/nm/km y dispersión por modo de polarización de 0.2 ps/ \sqrt{km} ; así mismo la atenuación por splitter de 1x8 de primer y segundo nivel con 9.03 dB por defecto agregando 1.35 dB para obtener 10.38 dB en cada uno; y finalmente agregando un atenuador óptico en cada tramo, para simular las pérdidas adicionales por inserción y empalmes. En la Fig. 65, se observa la ODN de referencia para la red XGS-PON:

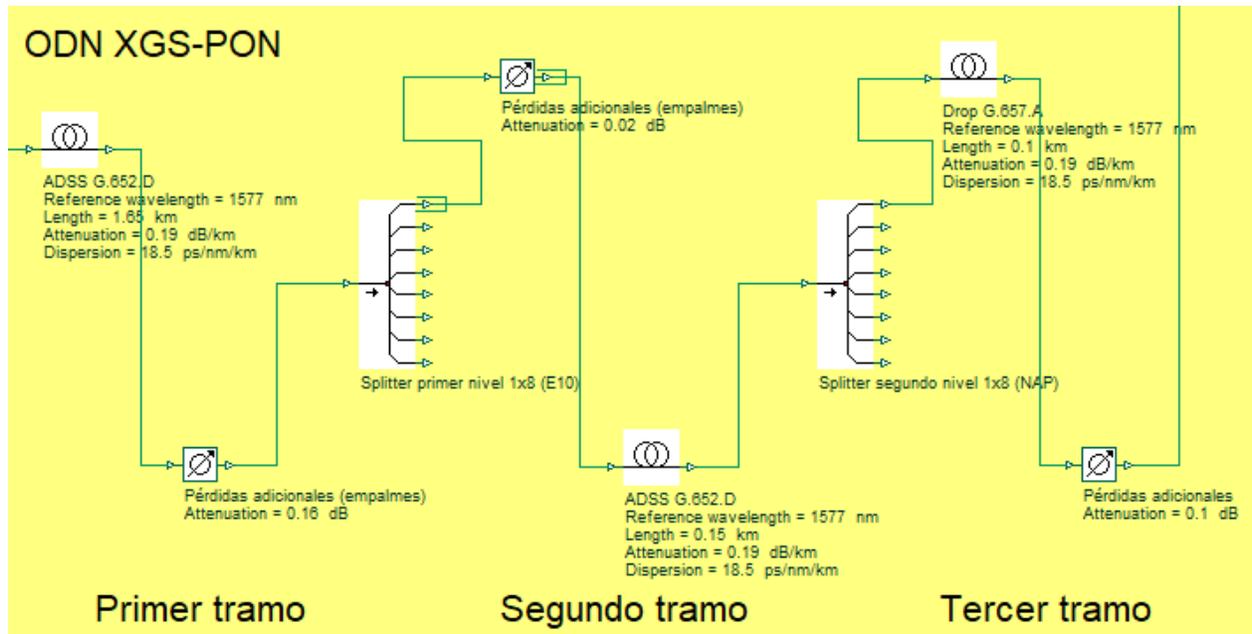


Fig. 65. ODN para XGS-PON

En las siguientes figuras se observan las configuraciones realizadas y la potencia recibida en el splitter de segundo nivel:

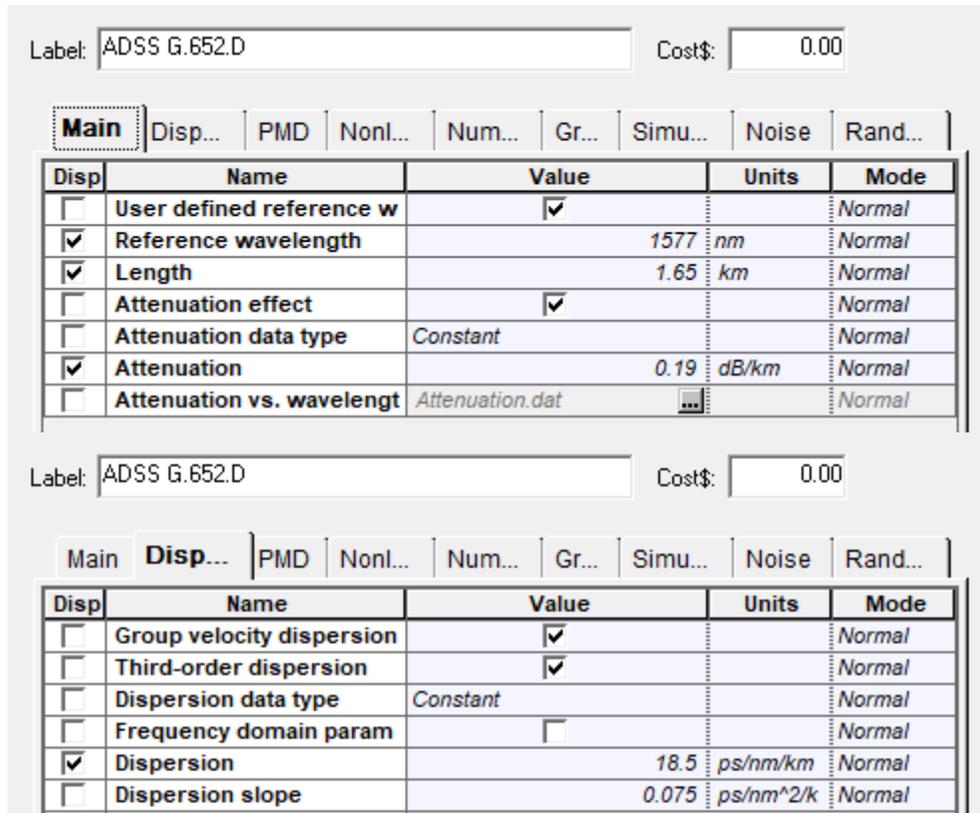


Fig. 66. Configuraciones realizadas ODN XGS-PON



Fig. 67. Potencia de recepción en splitter de segundo nivel XGS-PON

- Bloque de unidad de red óptica ONU XGS-PON:** Para la implementación de la ONU, se tuvo en cuenta la etapa de filtración y la etapa de fotodetección mediante un receptor óptico, por lo cual se usó un filtro pasabanda de Bessel de segundo orden, con un ancho de banda de 30 Ghz centralizado en 1577 nm (190.1 THz); un fotodetector del tipo APD con una ganancia de 3, capacidad de respuesta de 1 A/W y corriente de oscuridad 50 nA (esto de acuerdo a la hoja de datos que se obtuvo de los fotodetectores usados en los receptores ópticos XGS-PON) y por último configurando un filtro pasabajo que viene integrado al receptor. En la Fig. 68, se puede observar el bloque que representa la ONU:

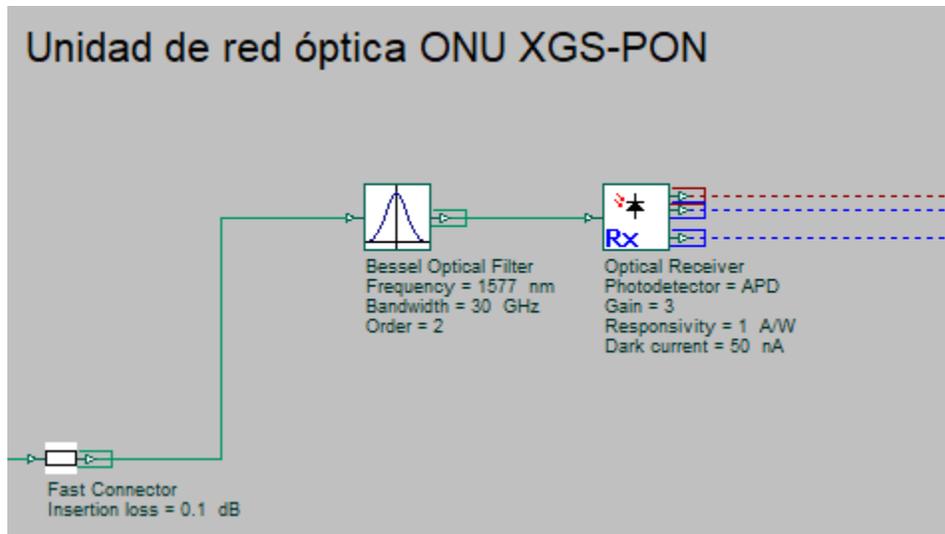


Fig. 68. Bloque de la ONU XGS-PON

En la siguiente figura se muestran las configuraciones que se hicieron en bloque de la unidad de red óptica XGS-PON:

Label: Cost\$:

Main | Simulation | Noise

Disp	Name	Value	Units	Mode
<input checked="" type="checkbox"/>	Frequency	1577	nm	Normal
<input checked="" type="checkbox"/>	Bandwidth	30	GHz	Normal
<input type="checkbox"/>	Insertion loss	0	dB	Normal
<input type="checkbox"/>	Depth	100	dB	Normal
<input checked="" type="checkbox"/>	Order	2		Normal

Label: Cost\$:

Main | Low Pass ... | 3R Regen... | Downsam... | Noise | Random n...

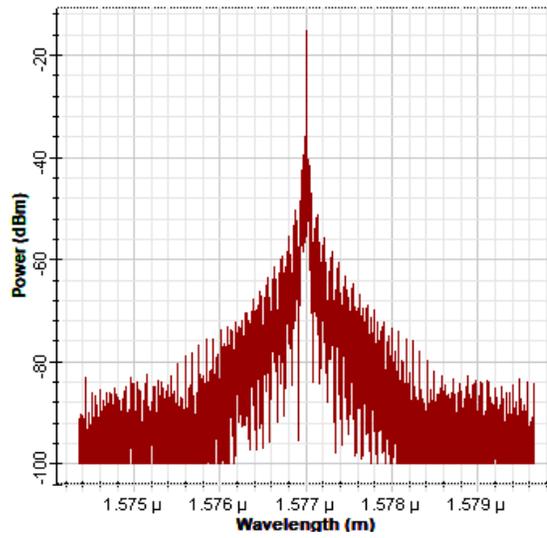
Disp	Name	Value	Units	Mode
<input checked="" type="checkbox"/>	Photodetector	APD		Normal
<input checked="" type="checkbox"/>	Gain	3		Normal
<input type="checkbox"/>	Ionization ratio	0.9		Normal
<input checked="" type="checkbox"/>	Responsivity	1	A/W	Normal
<input checked="" type="checkbox"/>	Dark current	50	nA	Normal

Fig. 69. Configuraciones realizadas en la ONU XGS-PON

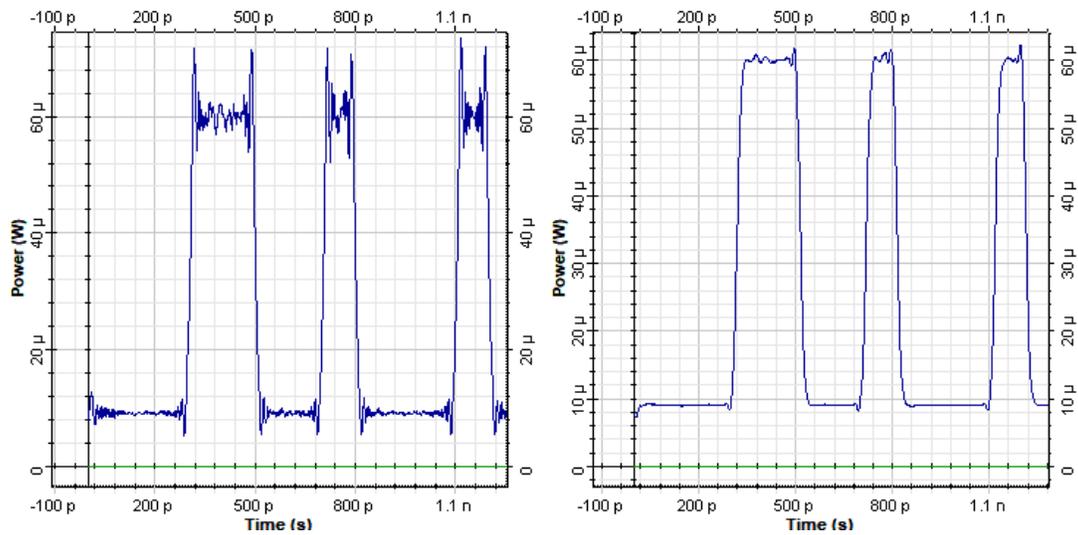
Con estos parámetros configurados, se obtuvo los siguientes resultados:



(a)



(b)



(c)

Fig. 70. (a) Potencia de recepción (b) Espectro (c) Señal recibida y señal filtrada (XGS-PON)

4.2.3. Simulación de la red NG-PON2

Para la implementación y simulación esta red, primeramente, se creó la representación de un puerto PON SFP NG-PON2 clase N2 de la OLT, con cuatro transmisores ópticos y un multiplexor WDM, de acuerdo con el bloque que representan el transmisor de esta tecnología, como en las investigaciones [6], [9]; teniendo en cuenta la Tabla 9 para su configuración y la hoja de datos de un transceptor de esta tecnología (véase anexo I). Así mismo, se realizó la creación de la ONU, con cuatro receptores ópticos considerando los elementos que la constituyen como los filtros y el tipo de fotodetector, de acuerdo con la información que se obtuvo de las investigaciones mencionadas, y realizando la configuración de sus parámetros con la hoja de datos del tipo de fotodetector utilizado en esta tecnología, como lo son la ganancia y la capacidad de respuesta [55]. También se colocaron equipos de medición, analizadores y visualizadores, con el propósito de verificar el recorrido de la señal óptica desde la salida de la OLT, las pérdidas ópticas a través de la ODN, hasta la potencia de recepción a la entrada del receptor óptico ONU.

- **Bloque del puerto NG-PON2 de la Terminal de línea óptica (OLT):** Se utilizó cuatro transmisores ópticos, cada uno conformado por un láser de onda continua configurados con una separación de frecuencia de 100 GHz, empezando con 187.8, 187.7, 187.6, 187.5 THz (1596.34, 1597.19, 1598.04, 1598.89 nm respectivamente) a una potencia promedio en cada láser de 12 dBm, para obtener una potencia de salida en cada modulador de 8.8 dBm, configurados a una tasa de extinción de 8.2 dB; así mismo, para cada transmisor, se utilizaron generadores de secuencia de bits pseudoaleatorio (PRBSG), configurados a una tasa de transmisión de 10 Gbps, conectados a su respectivo generador NRZ y modulador MZ; finalmente los 4 transmisores fueron combinados a un WDM de 4x1, configurando las cuatro canales con un filtro de Bessel de segundo orden para cada canal de 50 GHz y una pérdida por inserción de 0.2 dB adicional, que representa la pérdida por el acople con el multiplexor y las pérdidas con el ODF. En la Fig. 71, se muestra el bloque que representa el puerto NG-PON2 en Optisystem:

Puerto NG-PON2 - OLT

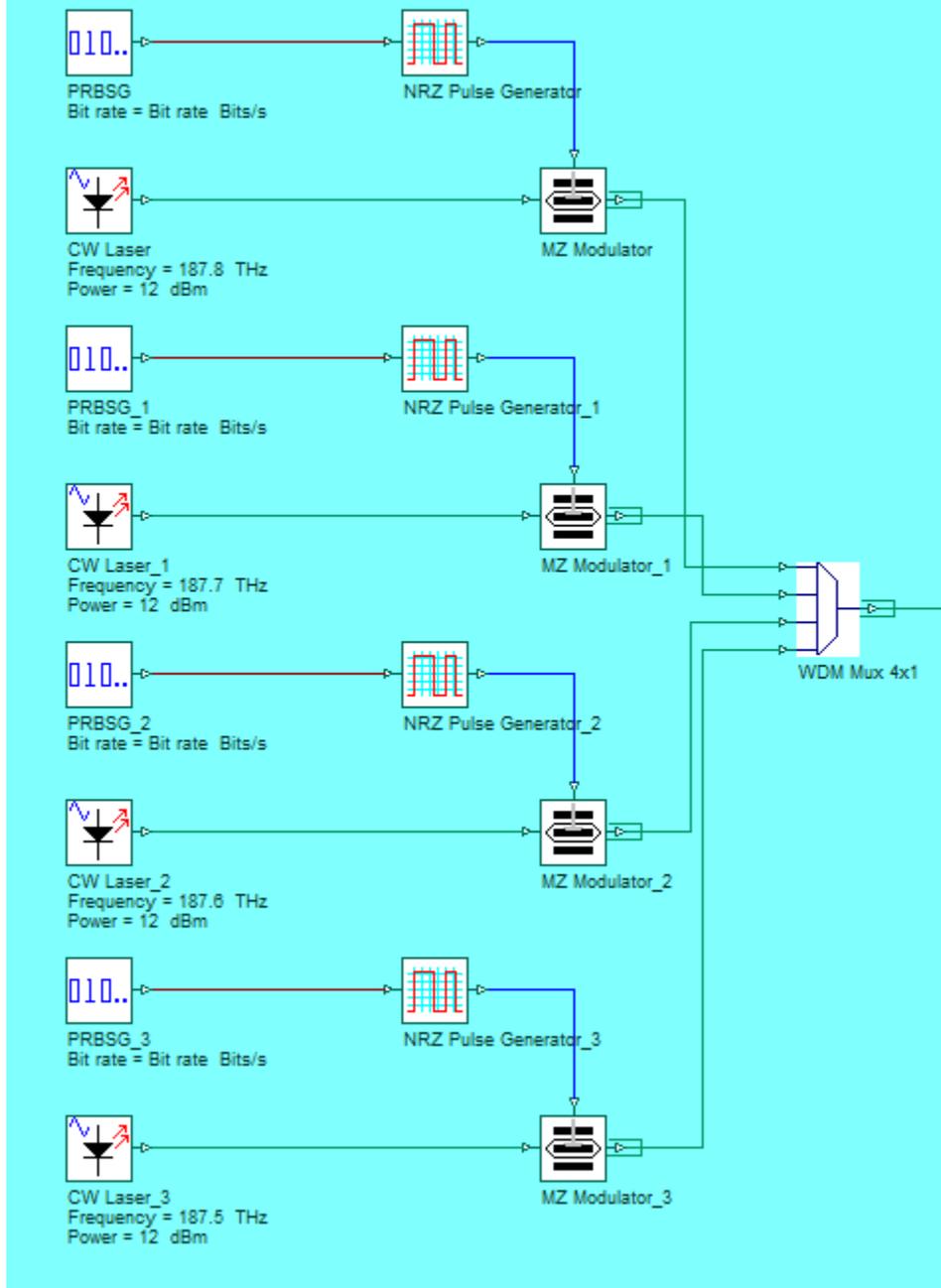


Fig. 71. Bloque del puerto NG-PON2 clase N2

Se puede observar en las siguientes figuras, las configuraciones realizadas, la potencia promedio de cada canal, así como el espectro de la señal total a la salida del multiplexor:

Label: Cost\$:

Main | Polarization | Simulation | Noise | Random numbers

Disp	Name	Value	Units	Mode
<input checked="" type="checkbox"/>	Frequency	187.8	THz	Normal
<input checked="" type="checkbox"/>	Power	12	dBm	Normal
<input type="checkbox"/>	Linewidth	10	MHz	Normal
<input type="checkbox"/>	Initial phase	0	deg	Normal

Label:

Simulation | Signals | Spatial effects | Noise | Signal tracing

Name	Value	Units	Mode
Simulation window	Set bit rate		Normal
Reference bit rate	<input checked="" type="checkbox"/>		Normal
Bit rate	10000000000	Bits/s	Normal
Time window	1.28e-008	s	Normal
Sample rate	640000000000	Hz	Normal
Sequence length	128	Bits	Normal
Samples per bit	64		Normal
Number of samples	8192		Normal

Label: Cost\$:

Main | Simulation

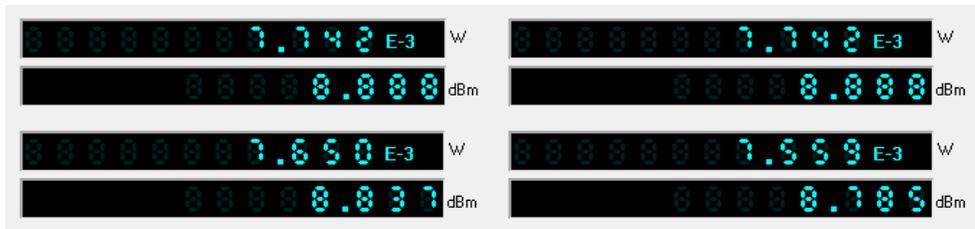
Disp	Name	Value	Units	Mode
<input type="checkbox"/>	Extinction ratio	8.2	dB	Normal
<input type="checkbox"/>	Negative signal chirp	<input type="checkbox"/>		Normal
<input type="checkbox"/>	Symmetry factor	-1		Normal

Label: Cost\$:

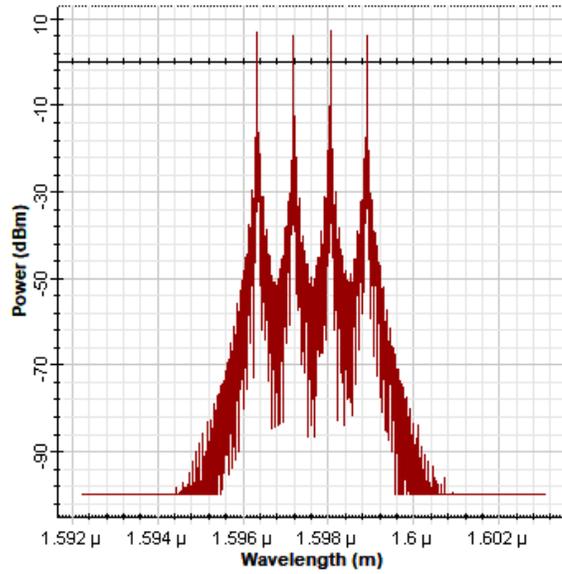
Main | Channels | Ripple | Simulation | Noise

Disp	Name	Value	Units	Mode
<input type="checkbox"/>	Bandwidth	50	GHz	Normal
<input type="checkbox"/>	Insertion loss	0.2	dB	Normal
<input type="checkbox"/>	Depth	100	dB	Normal
<input type="checkbox"/>	Filter type	Bessel		Normal
<input type="checkbox"/>	Filter order	2		Normal

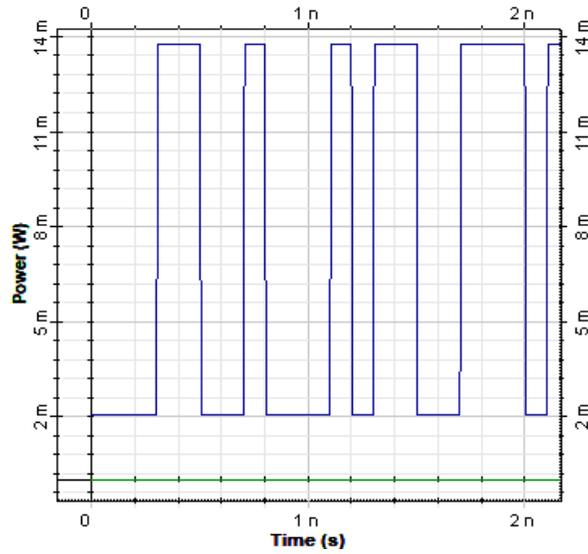
Fig. 72. Configuraciones realizadas en el bloque del puerto NG-PON2



(a)



(b)



(c)

Fig. 73. (a) Potencias de salida de cada canal (b) Espectro de la señal (c) Señal de salida en 187.8 THz

- Red de distribución óptica (ODN) de la red NG-PON2:** En la ODN se configuró el hilo de fibra en cada tramo, con su distancia respectiva y los parámetros correspondientes con las frecuencias de referencia de 187.8, 187.7, 187.6, 187.5 THz (1596.34, 1597.19, 1598.04, 1598.89 nm respectivamente) del usuario más lejano, como la pérdida por distancia promedio de 0.19 dB/km, dispersión cromática de 19.5 ps/nm/km y dispersión por modo de polarización de 0.2 ps/ \sqrt{km} ; así mismo la atenuación por splitter de primer y segundo nivel de 1x8 con 9.03 dB por defecto agregando 1.35 dB para obtener 10.38 dB; y finalmente agregando un atenuador óptico en cada tramo, para simular las pérdidas adicionales por inserción y empalmes. En la Fig. 74, se observa la ODN de referencia para la red NG-PON2:

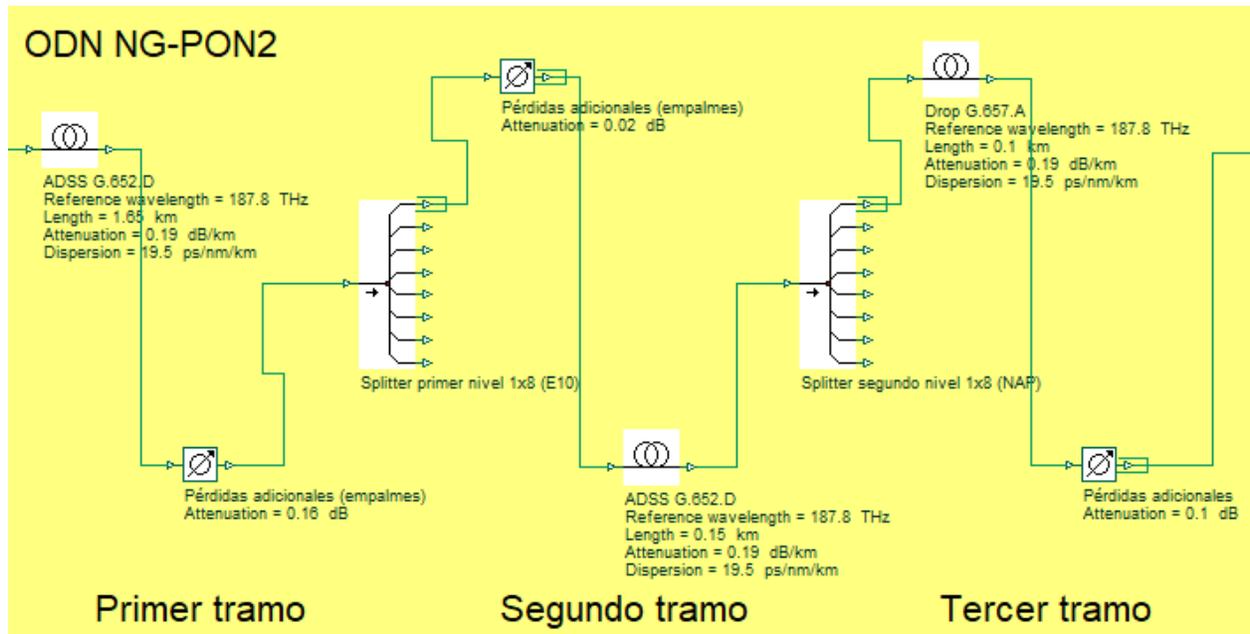


Fig. 74. ODN para NG-PON2

En las siguientes figuras se muestra las configuraciones realizadas y el espectro de la señal en el splitter de segundo nivel:

Label: Cost\$:

Main
 Disp...
 PMD
 Nonl...
 Num...
 Gr...
 Simu...
 Noise
 Rand...

Disp	Name	Value	Units	Mode
<input type="checkbox"/>	User defined reference w	<input checked="" type="checkbox"/>		Normal
<input checked="" type="checkbox"/>	Reference wavelength	187.8	THz	Normal
<input checked="" type="checkbox"/>	Length	1.65	km	Normal
<input type="checkbox"/>	Attenuation effect	<input checked="" type="checkbox"/>		Normal
<input type="checkbox"/>	Attenuation data type	Constant		Normal
<input checked="" type="checkbox"/>	Attenuation	0.19	dB/km	Normal
<input type="checkbox"/>	Attenuation vs. wavelengt	Attenuation.dat		Normal

Label: Cost\$:

Main
 Disp...
 PMD
 Nonl...
 Num...
 Gr...
 Simu...
 Noise
 Rand...

Disp	Name	Value	Units	Mode
<input type="checkbox"/>	Group velocity dispersion	<input checked="" type="checkbox"/>		Normal
<input type="checkbox"/>	Third-order dispersion	<input checked="" type="checkbox"/>		Normal
<input type="checkbox"/>	Dispersion data type	Constant		Normal
<input type="checkbox"/>	Frequency domain param	<input type="checkbox"/>		Normal
<input checked="" type="checkbox"/>	Dispersion	19.5	ps/nm/km	Normal
<input type="checkbox"/>	Dispersion slope	0.075	ps/nm ² /k	Normal

Fig. 75. Configuraciones realizadas ODN NG-PON2

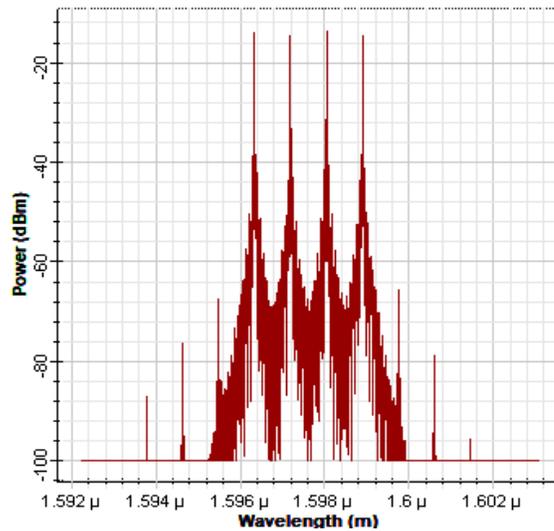


Fig. 76. Espectro de la señal en el splitter de segundo nivel

- Unidad de red óptica ONU NG-PON2:** Para la implementación de la ONU, se creó cuatro receptores ópticos y un demultiplexor para la separación de los canales, donde cada receptor está compuesto por un filtro óptico pasabanda de Bessel de segundo orden, centralizadas en las frecuencias de 187.8, 187.7, 187.6, 187.5 THz, con un ancho de banda de 30 GHz en cada uno. Así mismo, los receptores ópticos fueron configurados con una ganancia de 3, capacidad de respuesta de 1 A/W y corriente de oscuridad de 50 nA y un filtro pasabajo. En la Fig. 77, se puede observar el bloque ONU NG-PON2:

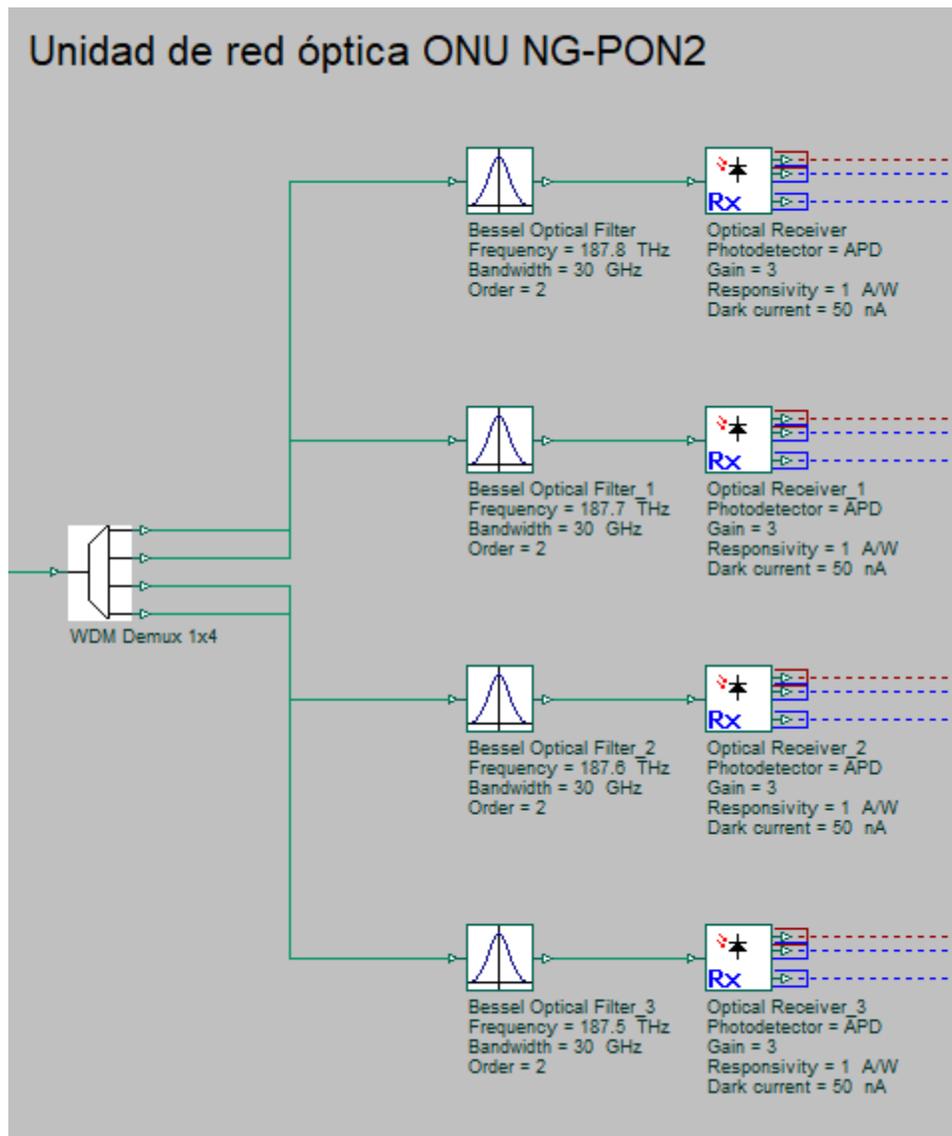


Fig. 77. Bloque ONU de NG-PON2

En la siguiente figura se muestran las configuraciones que se hicieron en cada bloque de la unidad de red óptica NG-PON2:

Label: Cost\$:

Main | Channels | Ripple | Simulation | Noise

Disp	Name	Value	Units	Mode
<input type="checkbox"/>	Bandwidth	50	GHz	Normal
<input type="checkbox"/>	Insertion loss	0.2	dB	Normal
<input type="checkbox"/>	Depth	100	dB	Normal
<input type="checkbox"/>	Filter type	Bessel		Normal
<input type="checkbox"/>	Filter order	2		Normal

Label: Cost\$:

Main | Simulation | Noise

Disp	Name	Value	Units	Mode
<input checked="" type="checkbox"/>	Frequency	187.8	THz	Normal
<input checked="" type="checkbox"/>	Bandwidth	30	GHz	Normal
<input type="checkbox"/>	Insertion loss	0	dB	Normal
<input type="checkbox"/>	Depth	100	dB	Normal
<input checked="" type="checkbox"/>	Order	2		Normal

Label: Cost\$:

Main | Low Pass ... | 3R Regen... | Downsam... | Noise | Random n...

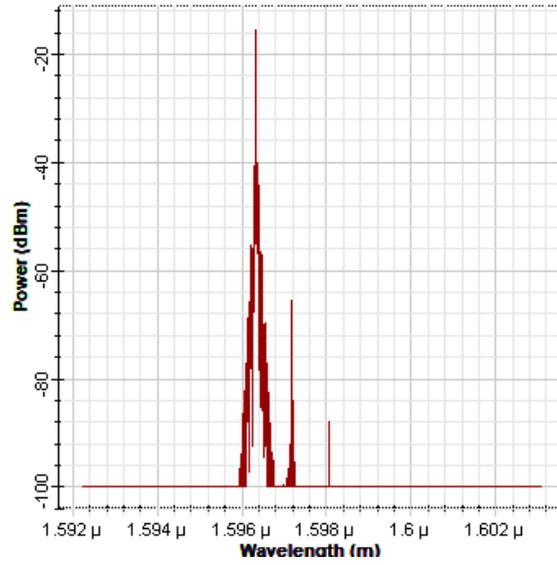
Disp	Name	Value	Units	Mode
<input checked="" type="checkbox"/>	Photodetector	APD		Normal
<input checked="" type="checkbox"/>	Gain	3		Normal
<input type="checkbox"/>	Ionization ratio	0.9		Normal
<input checked="" type="checkbox"/>	Responsivity	1	A/W	Normal
<input checked="" type="checkbox"/>	Dark current	50	nA	Normal

Fig. 78. Configuraciones realizadas ONU NG-PON2

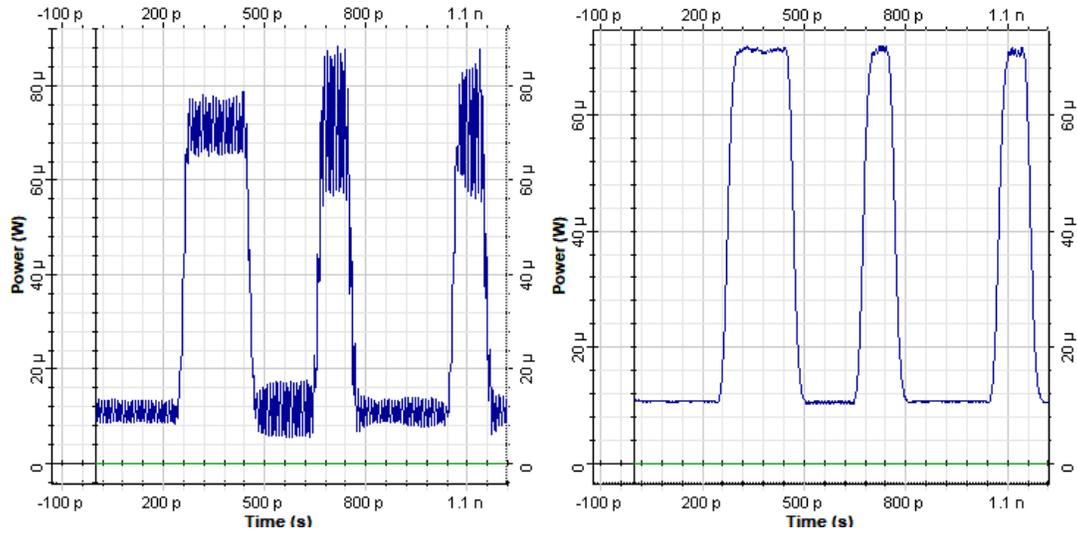
Con estos parámetros configurados, se obtuvo los siguientes resultados:



(a)



(b)



(c)

Fig. 79. (a) Potencias de recepción en los 4 canales (b) Espectro en 187.8 THz (c) Señal recibida y señal filtrada en 187.8 THz

CAPITULO V: ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS REDES PON

5.1. Resultados obtenidos de parámetros de rendimiento de la simulación

Para la evaluación del rendimiento de las tecnologías, se tiene información de las variables dependientes o parámetros de rendimiento como son el Factor Q y la tasa de error de bit (BER), a partir del diagrama de ojo que se obtuvo al realizar la simulación, mediante un analizador de diagrama de ojo que nos proporciona Optisystem, conectado a la salida del receptor óptico de cada tecnología del apartado 4.2. Estas variables son fundamentales para evaluar y asegurar el rendimiento de un sistema de comunicación óptica.

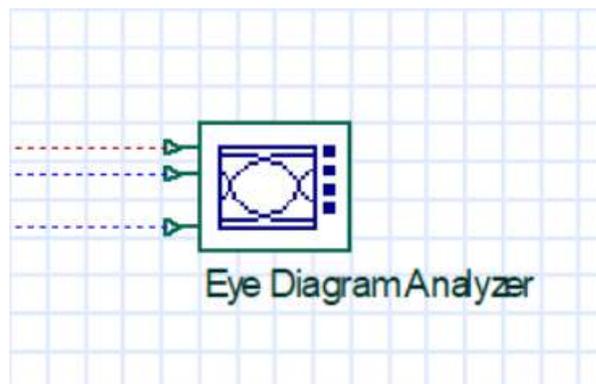


Fig. 80. Analizador de diagrama de ojo

De acuerdo con la simulación para el usuario más lejano y una división de 1:64, se obtuvo lo siguiente:

5.1.1. Resultados de GPON clase B+

De acuerdo con la simulación realizada en el apartado 4.2.1, se obtuvo el diagrama de ojo correspondiente como se ve en la Fig. 82:

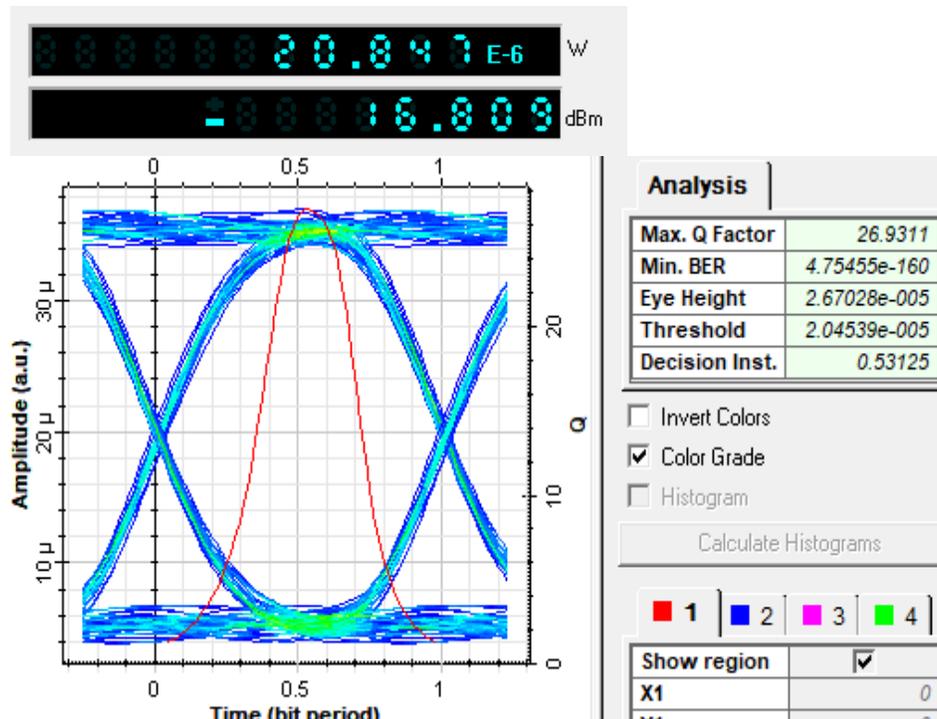


Fig. 81. Diagrama de ojo obtenido para GPON clase B+

- Se obtuvo una potencia de recepción de -16.809 dBm, en la ONU del usuario más lejano.
- Se observa un Factor Q de 26.9311.
- Se observa una tasa de error de bit de 4.75455×10^{-160} , lo que significa que hay 4.75 bits errados de 10^{160} bits transmitidos.
- Se observa una altura de diagrama de ojo de 2.67028×10^{-5} .

5.1.2. Resultados de XGS-PON clase N2

De acuerdo con la simulación realizada en el apartado 4.2.2, se obtuvo el diagrama de ojo correspondiente como se ve en la Fig. 83:

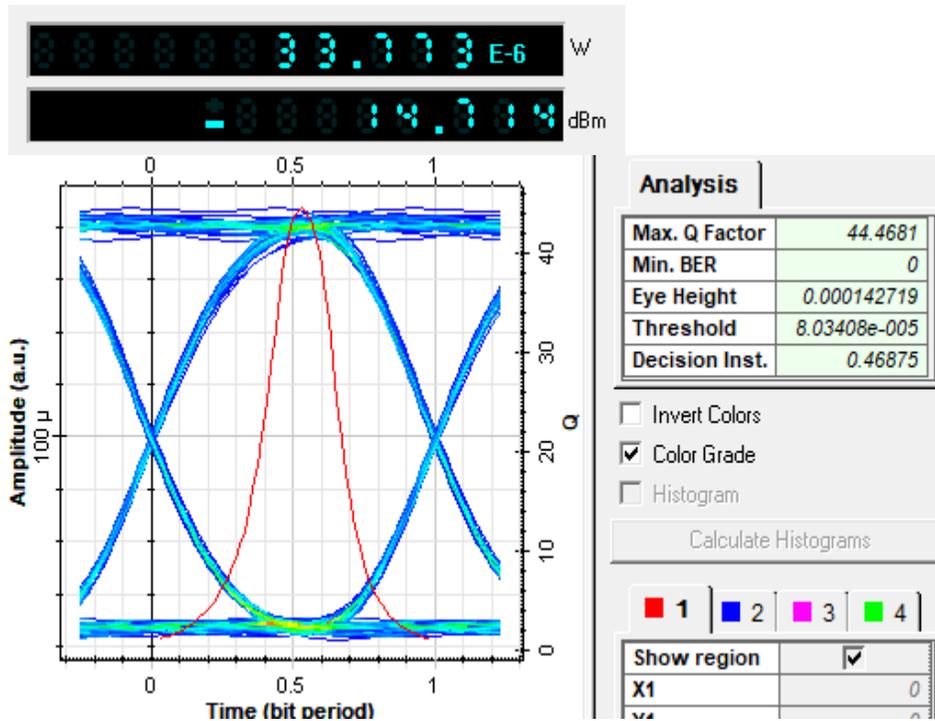


Fig. 82. Diagrama de ojo obtenido para XGS-PON clase N2

- Se obtuvo una potencia de recepción de -14.714 dBm, en la ONU del usuario más lejano.
- Se observa un Factor Q de 44.4681.
- Se observa una tasa de error de bit igual a cero, lo que indica que hay 0 bits errados en la recepción, y por consiguiente un alto rendimiento en las mismas condiciones de la ODN de la red GPON.
- Se observa una altura de diagrama de ojo de 1.42719×10^{-4} .

5.1.3. Resultados de NG-PON2 clase N2

De acuerdo con la simulación realizada en el apartado 4.2.3, se obtuvo el diagrama de ojo correspondiente, para los cuatro canales de recepción de esta tecnología, como se ve en las siguientes figuras:

Para el canal 187.8 THz:

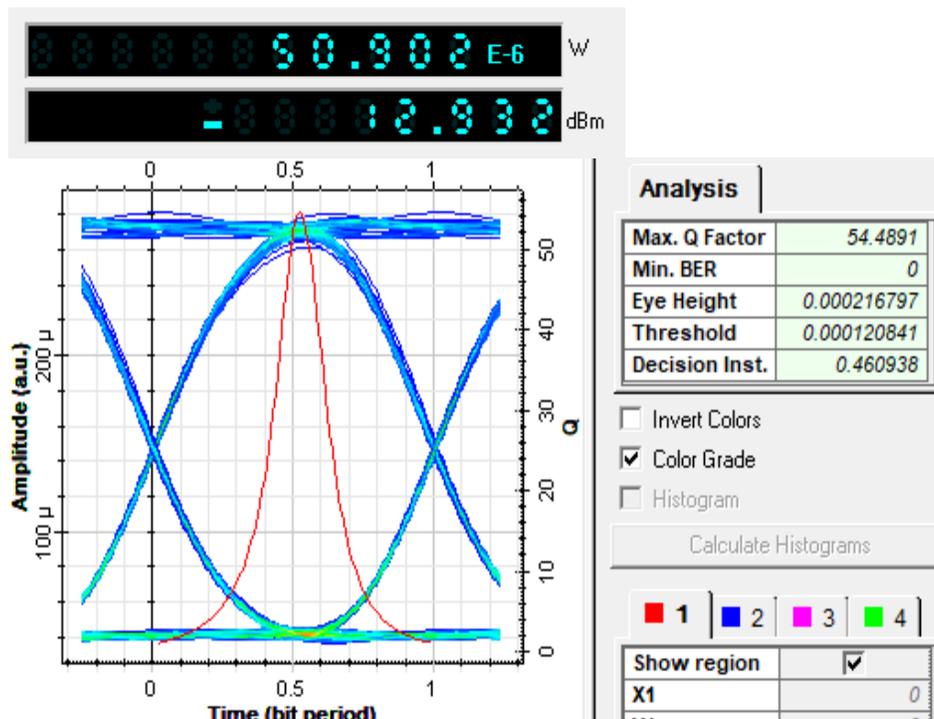


Fig. 83. Diagrama de ojo obtenido para 187.8 THz

- Se obtuvo una potencia de recepción de -12.932 dBm , en la ONU del usuario más lejano.
- Se observa un Factor Q de 54.4891.
- Se observa una tasa de error de bit de 0, lo que indica que hay 0 bits errados en la recepción, y por consiguiente un alto rendimiento en las mismas condiciones de la ODN de la red GPON.
- Se observa una altura de diagrama de ojo de 2.16797×10^{-4} .

Para el canal 187.7 THz:

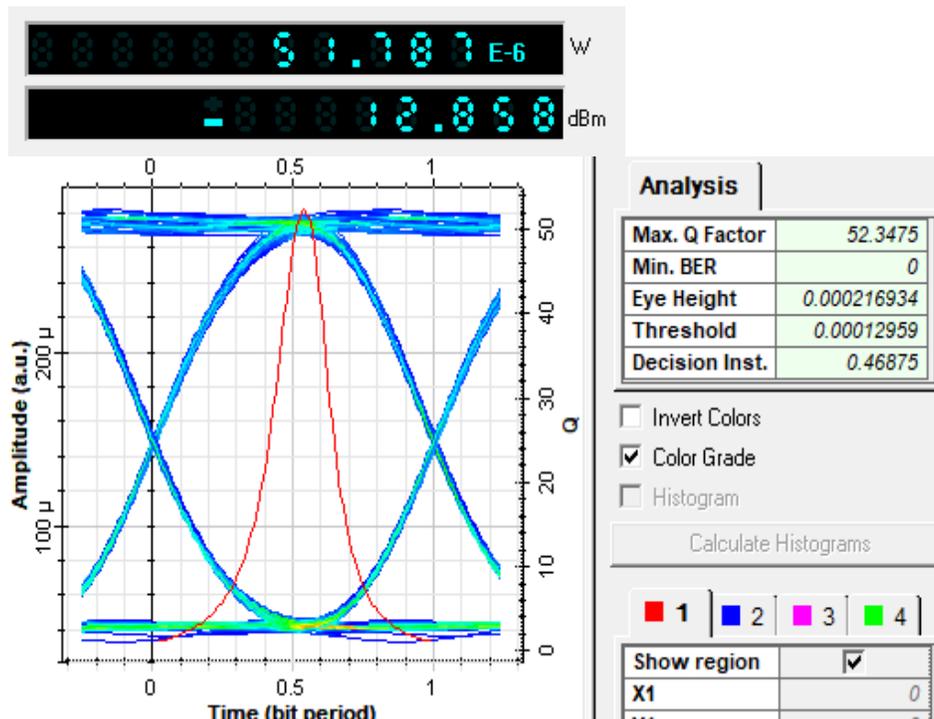


Fig. 84. Diagrama de ojo obtenido para 187.7 THz

- Se obtuvo una potencia de recepción de -12.858 dBm , en la ONU del usuario más lejano.
- Se observa un Factor Q de 52.3475.
- Se observa una tasa de error de bit de 0, lo que indica que hay 0 bits errados en la recepción, y por consiguiente un alto rendimiento en las mismas condiciones de la ODN de la red GPON.
- Se observa una altura de diagrama de ojo de 2.16934×10^{-4} .

Para el canal 187.6 THz:

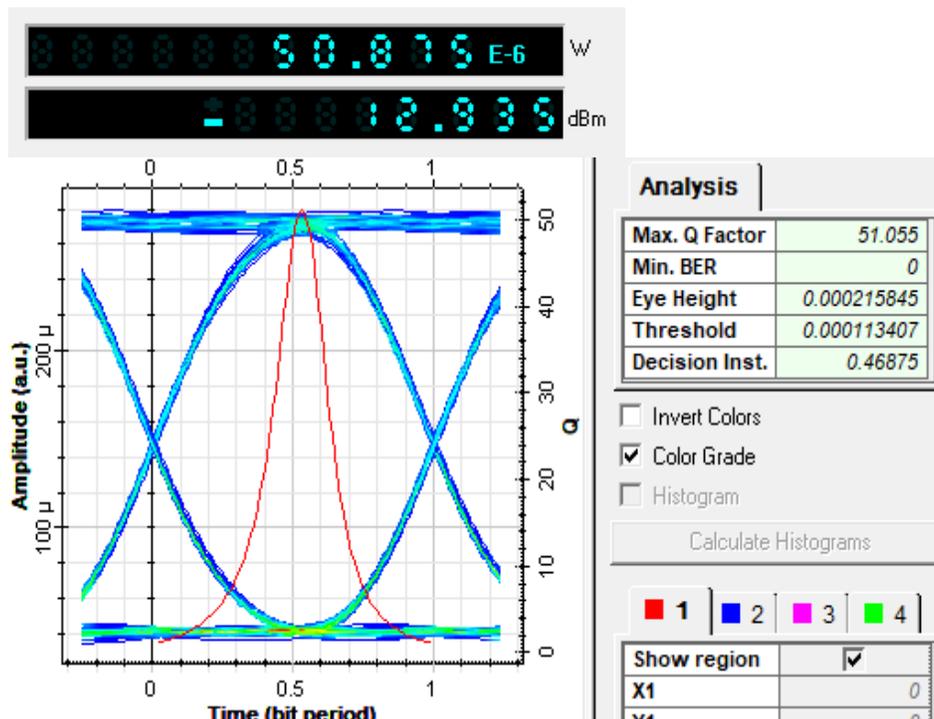


Fig. 85. Diagrama de ojo obtenido para 187.6 THz

- Se obtuvo una potencia de recepción de -12.935 dBm, en la ONU del usuario más lejano.
- Se observa un Factor Q de 51.055.
- Se observa una tasa de error de bit de, lo que indica que hay 0 bits errados en la recepción, y por consiguiente un alto rendimiento en las mismas condiciones de la ODN de la red GPON.
- Se observa una altura de diagrama de ojo de 2.15845×10^{-4} .

Para el canal 187.5 THz:

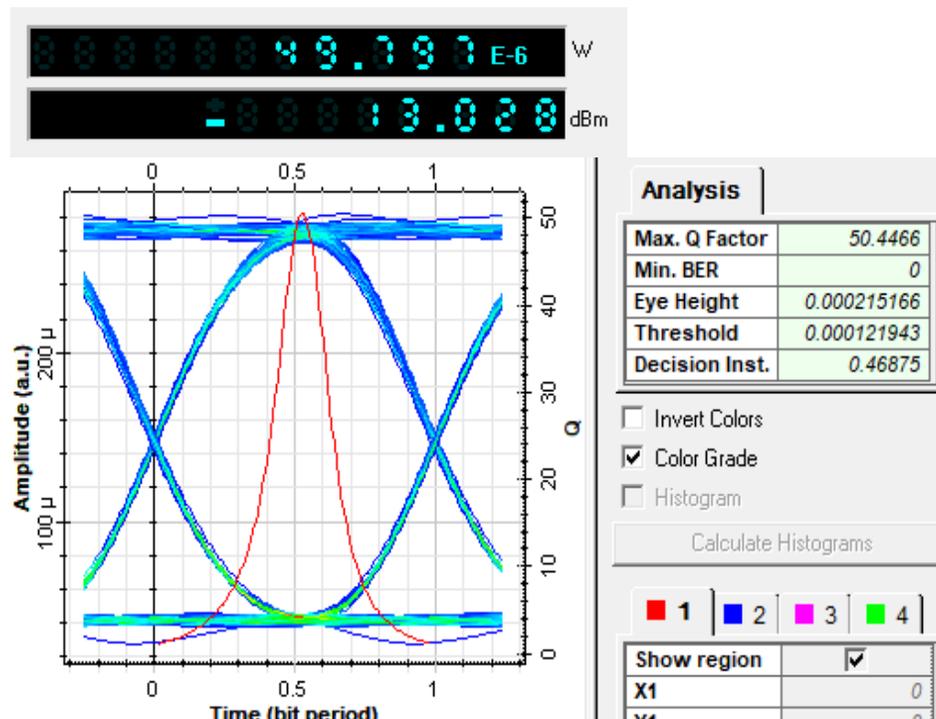


Fig. 86. Diagrama de ojo obtenido para 187.5 THz

- Se obtuvo una potencia de recepción de -13.028 dBm, en la ONU del usuario más lejano.
- Se observa un Factor Q de 50.4466.
- Se observa una tasa de error de bit de 0, lo que indica que hay 0 bits errados en la recepción, y por consiguiente un alto rendimiento en las mismas condiciones de la ODN de la red GPON.
- Se observa una altura de diagrama de ojo de 2.15165×10^{-4} .

Tabla 22. Comparativo del rendimiento en sentido descendente

Relación de división	Parámetro	GPON clase B+ (1490 nm)	XGS-PON clase N2 (1577 nm)	NG-PON2 clase N2			
				(187.8 THz)	(187.7 THz)	(187.6 THz)	(187.5 THz)
1:64	Prx	-16.809	-14.714	-12.932	-12.858	-12.935	-13.028
	Factor Q	26.9311	44.4681	54.4891	52.3475	51.055	50.4466
	BER	4.74E-160	0	0	0	0	0

Con los resultados obtenidos, se puede observar que NG-PON2 clase N2 ofrece un mejor rendimiento en sus cuatro canales de recepción con respecto a y GPON clase B+, para las mismas condiciones de la ODN del usuario más lejano. Así mismo, XGS-PON clase N2 ofrece un mayor rendimiento frente a GPON, para las mismas condiciones, pero menor a NG-PON2.

Esta diferencia radica en el hecho de que estas nuevas tecnologías, operan con una mayor potencia de transmisión y por consiguiente una mayor potencia de recepción en la ONU (de acuerdo a la clase que se escogió como referencia para la simulación). Así mismo, en la etapa de fotodetección de las ONU de estas nuevas tecnologías, presenta una capacidad de respuesta mayor y una ganancia adicional, para así asegurar la recepción a una tasa de transmisión de 10 Gbps, y en general la fiabilidad del sistema, por lo que es de esperar que estas nuevas tecnologías presenten un mejor rendimiento que su antecesora GPON clase B+.

5.2. Análisis comparativo del rendimiento a diferentes potencias de recepción

El desarrollo de análisis del rendimiento para diferentes potencias de recepción de estas tecnologías, se realizó bajo ciertas consideraciones y condiciones, para una mejor visualización y evaluación de los parámetros, por lo cual, en la etapa de recepción o el bloque que representa la ONU de cada tecnología, se hizo una modificación agregando un atenuador óptico configurado con un valor específico ubicado entre el conector y el filtro óptico, con el fin de variar la potencia de recepción de mayor a menor, a partir de las potencias de recepción de cada tecnología que se obtuvo en las simulaciones del apartado 4.2, y lograr una obtención correlativa de los parámetros de rendimiento. Es por ello que, a partir de las potencias de recepción obtenidas en las simulaciones, fueron variadas mediante el atenuador con un valor específico, para la comparación de las tecnologías en un rango establecido, hasta valores aproximados a la potencia de sensibilidad o potencias de recepción críticas de cada tecnología. Por lo que, mediante este método se pudo evaluar las diferencias del rendimiento.

En cuanto a la etapa del puerto SFP transmisor y la ODN, no se hicieron modificaciones, y se mantuvo las mismas condiciones en los parámetros característicos propia de cada tecnología,

como la potencia, longitud de onda y tasa de transmisión; así como las pérdidas, dispersión y de una relación de división de 1:64 usuarios en la ODN, establecidas en la simulación realizada en el capítulo anterior.

En las siguientes figuras se observan la ubicación de cada atenuador óptico en cada una de las ONU, y su respectivo valor configurado:

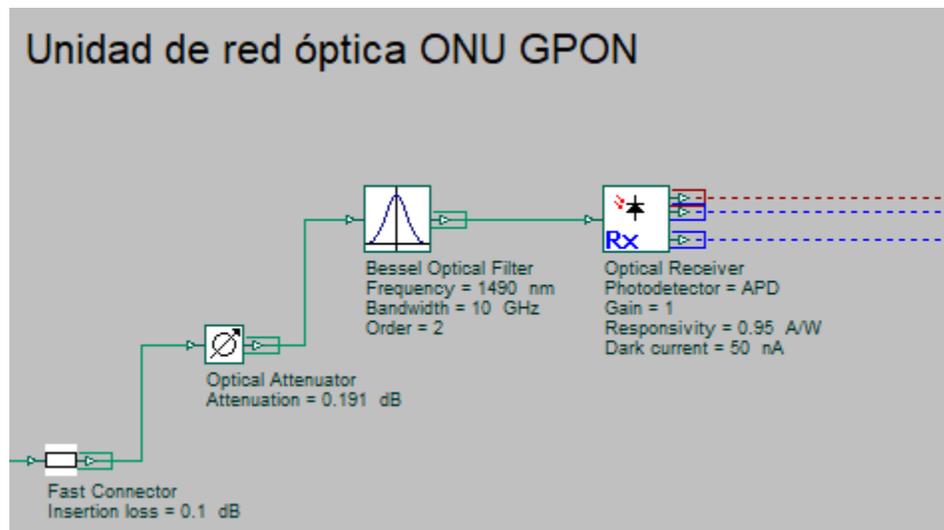


Fig. 87. Ubicación del atenuador en la ONU GPON

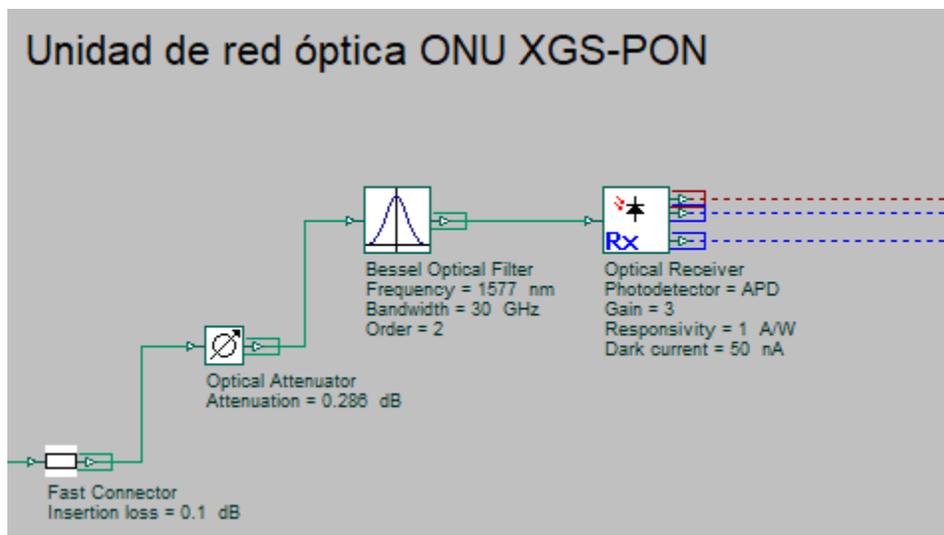


Fig. 88. Ubicación del atenuador en la ONU XGS-PON

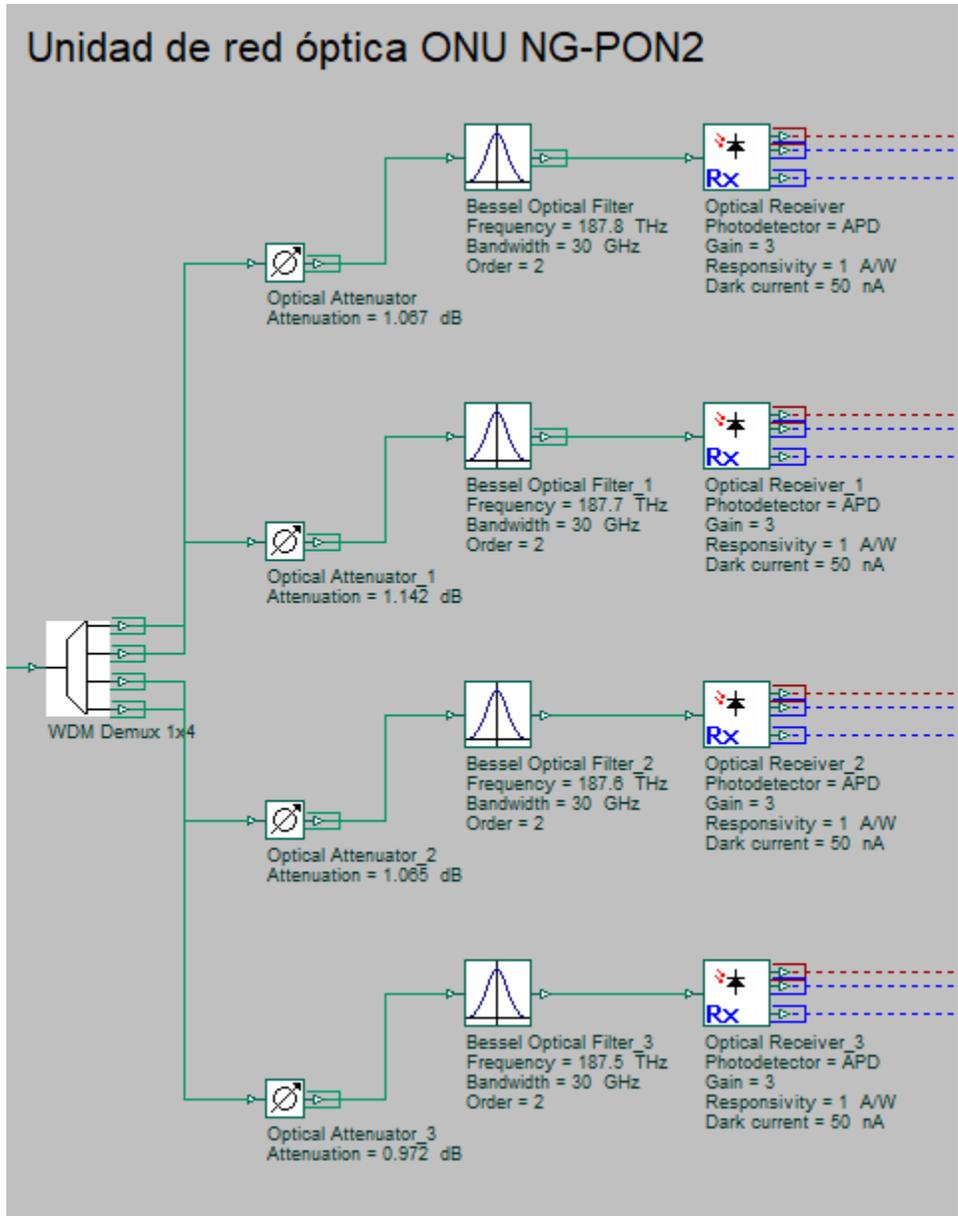


Fig. 89. Ubicación de atenuadores en la ONU NG-PON2

Una vez que se realizó esta modificación en cada ONU, las potencias de recepción en la entrada de cada ONU son las siguientes:

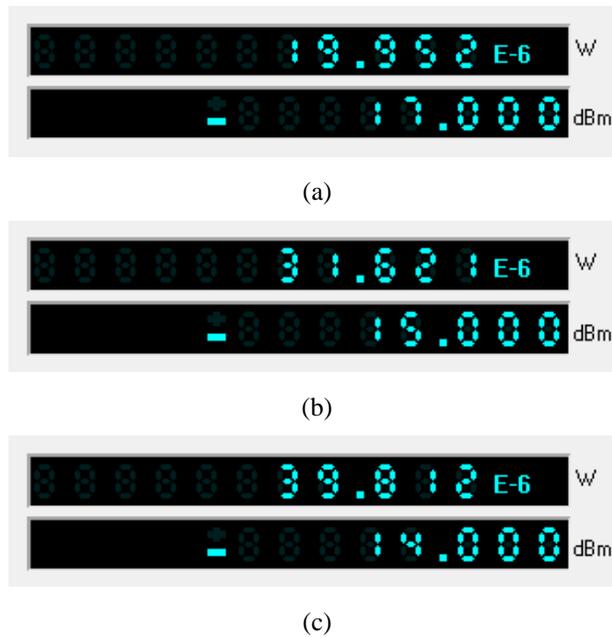


Fig. 90. Potencias de recepción iniciales para: (a) GPON (b) XGS-PON (c) NG-PON2

5.2.1. Datos obtenidos y análisis

A partir de los valores de la Fig. 90, se hizo la variación del atenuador óptico de cada bloque ONU, con saltos de 0.5 dB hasta llegar a un valor aproximado de la potencia de sensibilidad de los receptores ópticos de cada tecnología, para que, en el rango de las diferentes potencias de recepción, se logre la visualización de los parámetros de rendimiento con un analizador del diagrama de ojo, obteniendo así el Factor Q y la tasa de error de bit (BER). Para el caso del bloque GPON ONU, la visualización empieza a partir de los -17 dBm hasta los -28 dBm y para el caso de los bloques ONU XGS-PON y NG-PON2, la visualización empieza desde los -15 dBm hasta los -29 dBm.

En las siguientes tablas y gráficos, se puede observar el Factor Q y la tasa de error de bit aplicando la ecuación (2.10), en función de la potencia de recepción en cada tecnología que se obtuvo en Optisystem:

Tabla 23. Resultados del Factor Q

Prx (dBm)	GPON clase B+	XGS-PON clase N2	NG-PON2 clase N2			
			(187.8 THz)	(187.7 THz)	(187.6 THz)	(187.5 THz)
-14	-	-	46.5979	44.4997	44.3127	44.0766
-14.5	-	-	43.126	41.2576	41.2861	40.9623
-15	-	42.4722	39.8147	38.1418	38.3702	37.9732
-15.5	-	39.1408	36.6727	35.165	35.5727	35.114
-16	-	36.0069	33.7274	32.3364	32.8957	32.3911
-16.5	-	33.0659	30.9502	29.6623	30.3459	29.8086
-17	25.8026	30.3128	28.3429	27.1464	27.9284	27.3694
-17.5	23.0632	27.7419	25.9052	24.79	25.6462	25.0745
-18	20.6139	25.3472	23.6507	22.5972	23.5004	22.9234
-18.5	18.4232	23.1222	21.5539	20.557	21.491	20.9144
-19	16.4621	21.06	19.617	18.6658	19.6161	19.0447
-19.5	14.7076	19.1533	17.8323	16.9199	17.873	17.3104
-20	13.1387	17.3947	16.1923	15.3141	16.2576	15.7068
-20.5	11.7364	15.7764	14.6861	13.8384	14.7654	14.2286
-21	10.4834	14.2907	13.3108	12.487	13.3923	12.8697
-21.5	9.36427	12.9298	12.0534	11.2526	12.1311	11.624
-22	8.36496	11.6857	10.9118	10.1264	10.9752	10.4848
-22.5	7.47284	10.5507	9.86036	9.10196	9.91849	9.44559
-23	6.67661	9.5173	8.91021	8.17122	8.95509	8.49964
-23.5	5.96607	8.57806	8.04644	7.32688	8.07887	7.64033
-24	5.33212	7.72588	7.26169	6.5623	7.27731	6.8612
-24.5	4.76657	6.95391	6.55108	5.87128	6.56055	6.15609
-25	4.26257	6.25565	5.90671	5.24734	5.90735	5.51919
-25.5	3.81351	5.62494	5.32377	4.6847	5.31652	4.94447
-26	3.413	5.05596	4.79664	4.17797	4.78351	4.42976
-26.5	3.05584	4.54328	4.32095	3.72211	4.30282	3.96041
-27	2.73735	4.08183	3.89174	3.31254	3.86986	3.54154
-27.5	2.45336	3.6669	3.50507	2.94478	3.4865	3.16543
-28	2.20017	3.29414	3.15721	2.6148	3.13027	2.82801
-28.5	-	2.95954	2.84462	2.31474	2.81594	2.52566
-29	-	2.65942	2.56399	2.10547	2.53375	2.25487

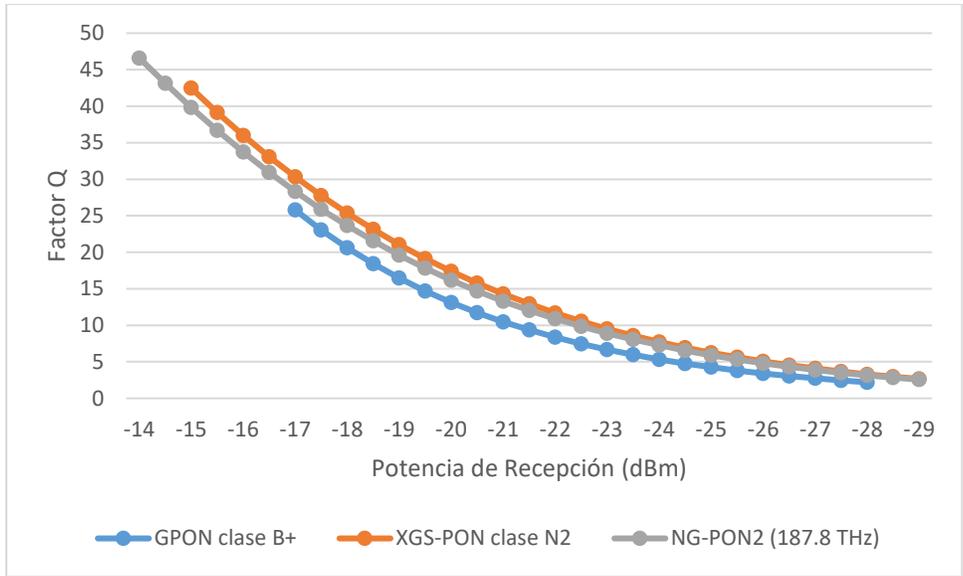
Tabla 24. Resultados BER

Prx (dBm)	GPON clase B+	XGS-PON clase N2	NG-PON2 clase N2			
			(187.8 THz)	(187.7 THz)	(187.6 THz)	(187.5 THz)
-14	-	-	0	0	0	0
-14.5	-	-	0	0	0	0
-15	-	0	0	0	0	0
-15.5	-	0	9.9485E-295	3.4286E-271	1.852E-277	2.0609E-270
-16	-	3.2619E-284	1.1466E-249	1.0774E-229	1.2661E-237	1.8315E-230
-16.5	-	4.5961E-240	1.2625E-210	1.177E-193	1.4229E-202	1.5112E-195
-17	4.1455E-147	3.8871E-202	5.1193E-177	1.3962E-162	6.0316E-172	3.1734E-165
-17.5	5.4216E-118	1.0911E-169	2.9097E-148	5.7461E-136	2.3308E-145	4.7194E-139
-18	1.02975E-94	4.8242E-142	5.8045E-124	2.3087E-113	2.0203E-122	1.3576E-116
-18.5	4.27953E-76	1.3846E-118	2.4335E-103	3.33136E-94	9.4498E-103	1.97989E-97
-19	3.4338E-61	9.2587E-99	5.53481E-86	4.69788E-78	5.63365E-86	3.63507E-81
-19.5	2.88074E-49	4.54218E-82	1.98379E-71	1.60488E-64	9.57089E-72	1.96339E-67
-20	9.87961E-40	4.52497E-68	2.85759E-59	3.0779E-53	9.86585E-60	6.7933E-56
-20.5	4.14712E-32	2.26129E-56	3.95697E-49	7.47486E-44	1.22433E-49	3.04443E-46
-21	5.14869E-26	1.25041E-46	1.00163E-40	4.39531E-36	3.35355E-41	3.33303E-38
-21.5	3.82889E-21	1.52806E-38	9.30557E-34	1.12432E-29	3.6136E-34	1.55608E-31
-22	3.00677E-17	7.54159E-32	5.06159E-28	2.10949E-24	2.51472E-28	5.073E-26
-22.5	3.92411E-14	2.521E-26	3.09137E-23	4.43581E-20	1.72975E-23	1.76704E-21
-23	1.22266E-11	8.88684E-22	2.5468E-19	1.52643E-16	1.69729E-19	9.50898E-18
-23.5	1.21518E-09	4.82433E-18	4.26186E-16	1.17786E-13	3.26848E-16	1.08333E-14
-24	4.85364E-08	5.55416E-15	1.91142E-13	2.6492E-11	1.70271E-13	3.41422E-12
-24.5	9.36943E-07	1.77649E-12	2.85612E-11	2.16222E-09	2.68048E-11	3.72814E-10
-25	1.01045E-05	1.97932E-10	1.74504E-09	7.71555E-08	1.73827E-09	1.70283E-08
-25.5	6.85035E-05	9.27862E-09	5.08192E-08	1.40185E-06	5.28853E-08	3.81756E-07
-26	0.00032126	2.14116E-07	8.06746E-07	1.47061E-05	8.61302E-07	4.7169E-06
-26.5	0.001122155	2.76928E-06	7.76794E-06	9.87825E-05	8.43189E-06	3.74106E-05
-27	0.003096818	2.23412E-05	4.97639E-05	0.000462265	5.44489E-05	0.000198899
-27.5	0.007076431	0.000122754	0.000228244	0.001615922	0.000244693	0.00077427
-28	0.013897418	0.000493617	0.000796433	0.004463986	0.000873229	0.002341917
-28.5	-	0.001540494	0.002223222	0.010313583	0.002431737	0.005774059
-29	-	0.003913766	0.005173826	0.017625208	0.005642461	0.012070745

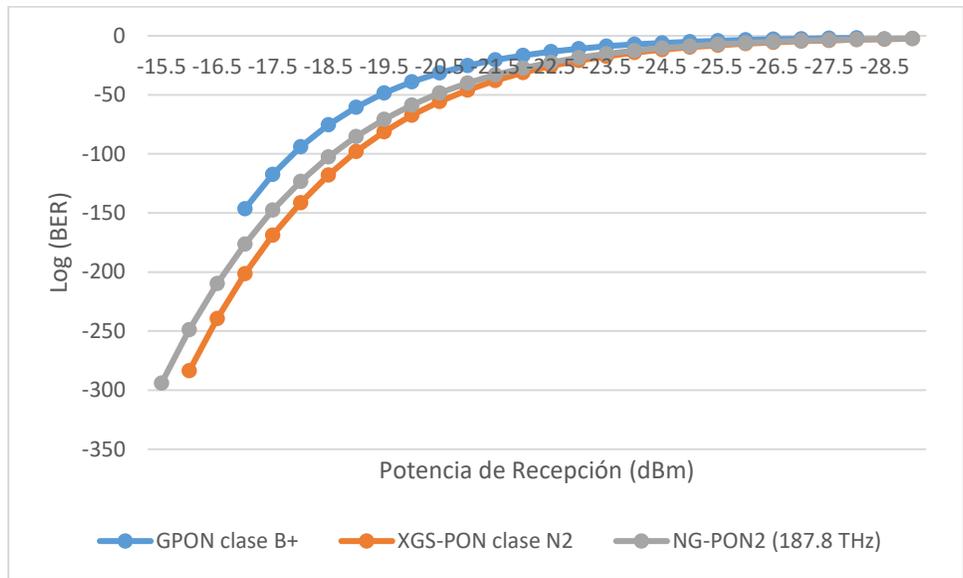
Tabla 25. Resultados Log (BER)

Prx (dBm)	GPON clase B+	XGS-PON clase N2	NG-PON2 clase N2			
			(187.8 THz)	(187.7 THz)	(187.6 THz)	(187.5 THz)
-14	-	-	-	-	-	-
-14.5	-	-	-	-	-	-
-15	-	-	-	-	-	-
-15.5	-	-	-294.0022404	-270.4648837	-276.7323563	-269.6859489
-16	-	-283.4865234	-248.9405857	-228.9676374	-236.8975389	-229.7372003
-16.5	-	-239.3376152	-209.8987789	-192.9292302	-201.846832	-194.8206718
-17	-146.3824267	-201.4103701	-176.2907905	-161.8550615	-171.2195676	-164.4984691
-17.5	-117.2658704	-168.9621316	-147.536159	-135.2406261	-144.6324989	-138.3261145
-18	-93.98726719	-141.3165716	-123.2362344	-112.6366353	-121.6945943	-115.8672161
-18.5	-75.36860365	-117.8586888	-102.6137708	-93.47737798	-102.0245756	-96.70335922
-19	-60.46422541	-98.03344807	-85.25689759	-77.3280982	-85.24921035	-80.43948748
-19.5	-48.54049598	-81.34273611	-70.70250411	-63.79455877	-71.01904769	-66.70699397
-20	-39.00526023	-67.34438467	-58.54400028	-52.51174506	-59.00586546	-55.16791929
-20.5	-31.38225335	-55.64564399	-48.40263704	-43.12639688	-48.91210293	-45.51649436
-21	-25.28830328	-45.90294583	-39.99929446	-35.35701026	-40.47449464	-37.47716104
-21.5	-20.41692707	-37.81585845	-33.03125681	-28.94910974	-33.44205962	-30.80796773
-22	-16.52190034	-31.1225372	-27.2957131	-23.67582328	-27.59951007	-25.29473473
-22.5	-13.40625853	-25.59842681	-22.50984961	-19.3530275	-22.76201654	-20.75275405
-23	-10.91269333	-21.05125248	-18.59400522	-15.81632262	-18.77024318	-17.02186614
-23.5	-8.915359292	-17.31656291	-15.3704011	-12.92890526	-15.48565372	-13.96523984
-24	-7.313932648	-14.25538146	-12.7186444	-10.57688459	-12.76885916	-11.46670798
-24.5	-6.028286726	-11.75043683	-10.5442232	-8.665100942	-10.57178682	-9.428507432
-25	-4.995486969	-9.703484375	-8.758195451	-7.112633217	-8.759881979	-7.768828948
-25.5	-4.164287305	-8.032516461	-7.293972153	-5.853298019	-7.276665021	-6.418213573
-26	-3.493143736	-6.669351801	-6.093263178	-4.832501839	-6.064844752	-5.326343258
-26.5	-2.949947181	-5.557633092	-5.10969392	-4.005320173	-5.074074936	-4.427005392
-27	-2.509084328	-4.650892762	-4.303085285	-3.335109437	-4.264010612	-3.701366812
-27.5	-2.150185727	-3.910963021	-3.64160135	-2.791579643	-3.611379001	-3.111107801
-28	-1.857065881	-3.306610269	-3.098850787	-2.350277191	-3.058872095	-2.630428469
-28.5	-	-2.812340127	-2.65301723	-1.986590447	-2.61408332	-2.238518772
-29	-	-2.407405161	-2.286188157	-1.753865748	-2.248531471	-1.918265927

De las tablas comparativas, se obtuvo los siguientes gráficos:

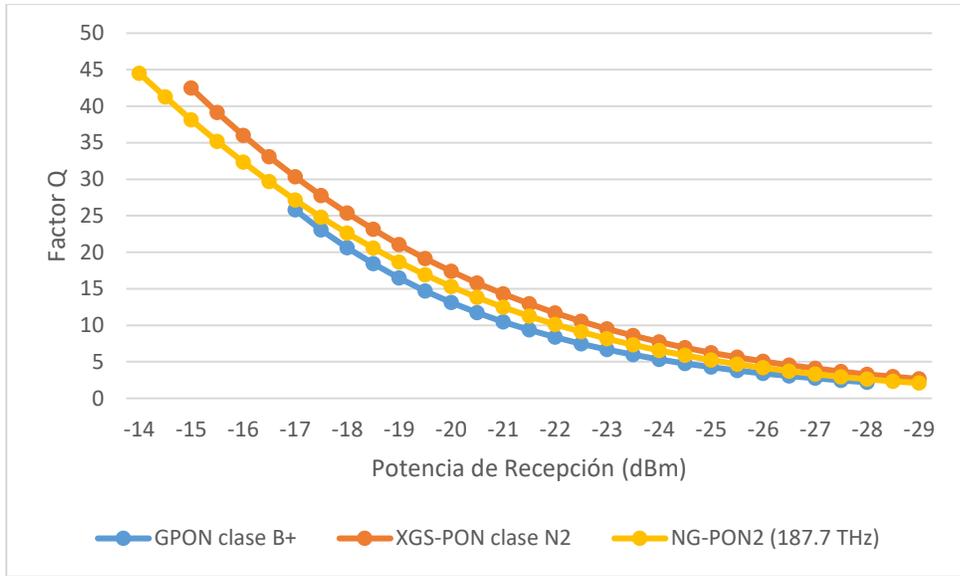


(a)

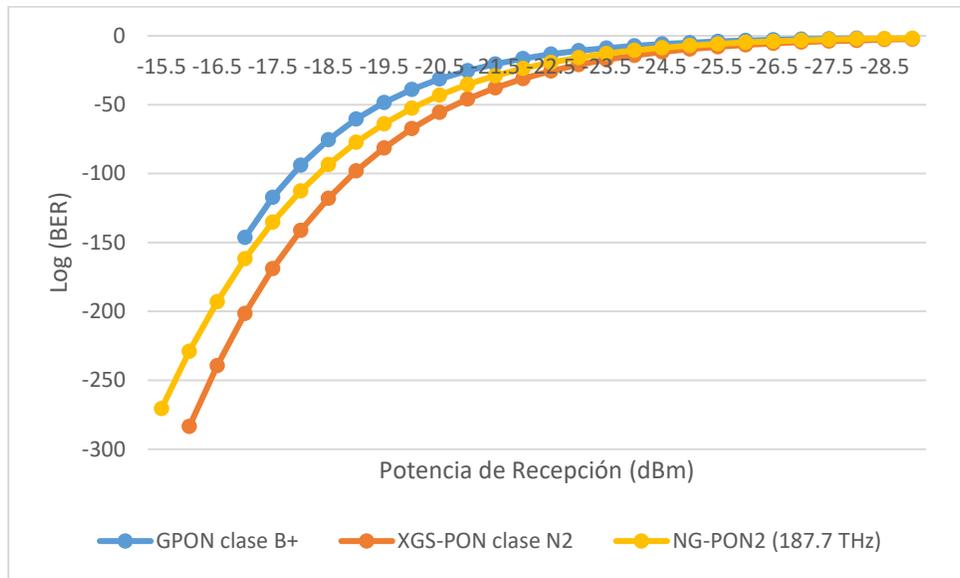


(b)

Fig. 91. Gráfico comparativo 1: (a) Factor Q (b) Log (BER)

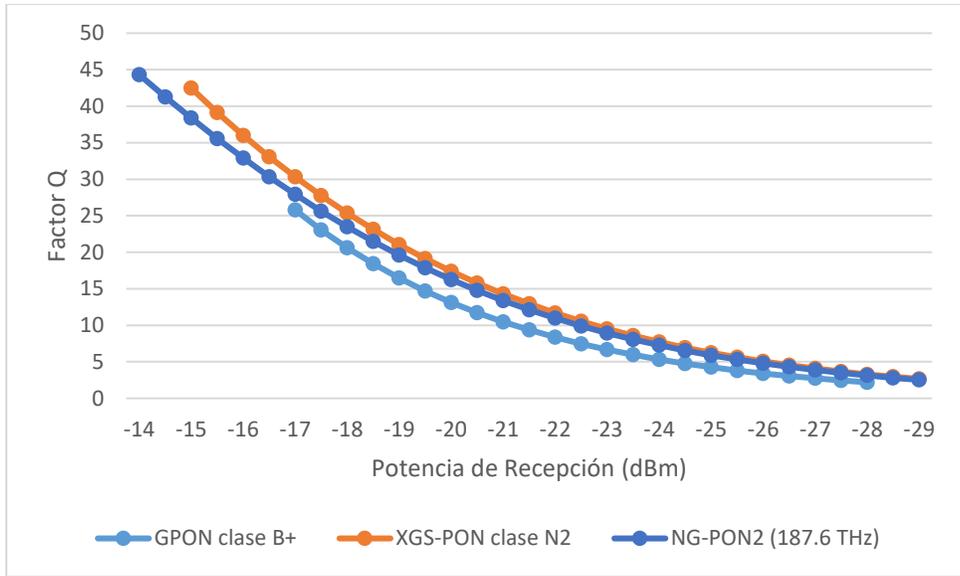


(a)

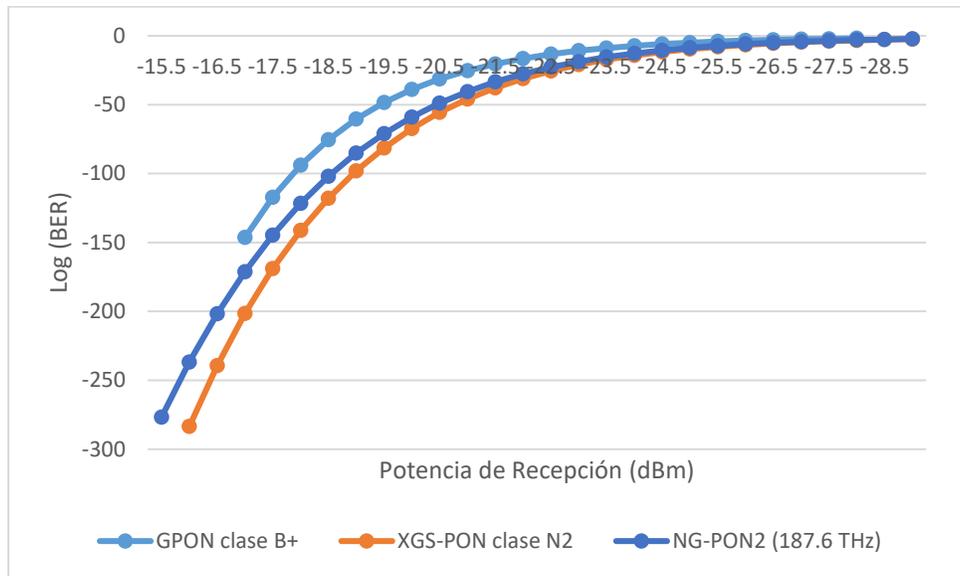


(b)

Fig. 92. Gráfico comparativo 2: (a) Factor Q (b) Log (BER)

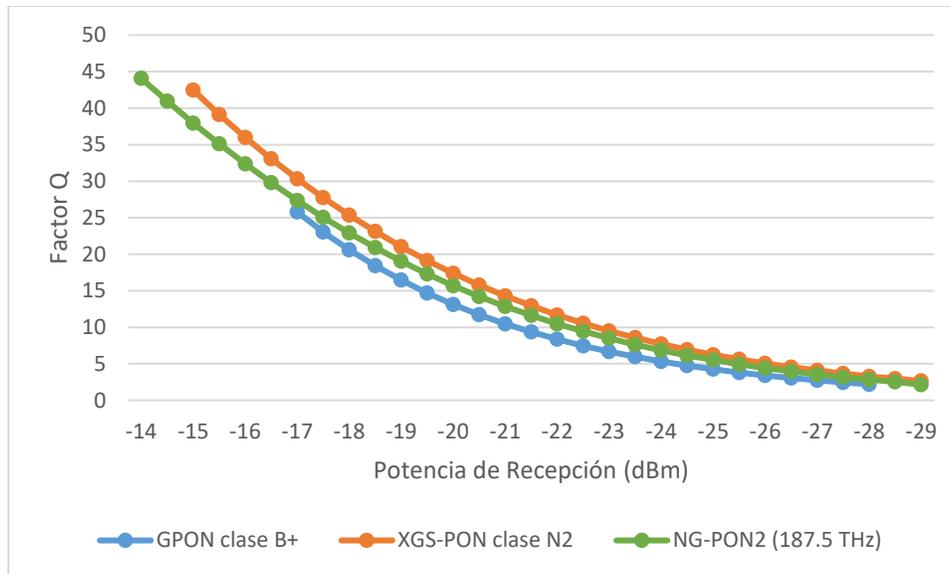


(a)

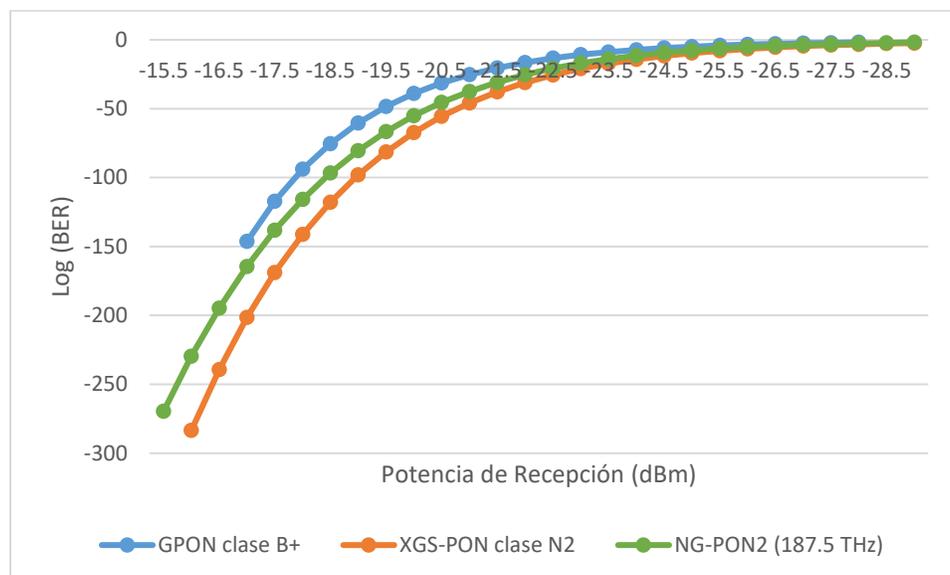


(b)

Fig. 93. Gráfico comparativo 3: (a) Factor Q (b) Log (BER)



(a)



(b)

Fig. 94. Gráfico comparativo 4: (a) Factor Q (b) Log (BER)

Los gráficos muestran cómo el **Factor Q** y **BER** varían con la potencia recibida para las diferentes tecnologías, donde el Factor Q disminuye casi exponencialmente, así como el aumento de la BER a medida que la potencia recibida se reduce. De acuerdo con los gráficos se puede observar lo siguiente:

- **GPON clase B+** es claramente la tecnología más vulnerable a la atenuación, lo que indica una menor calidad de señal (**Factor Q**) y una **tasa de error de bit (BER)** mayor. Su capacidad para mantener la calidad de señal se degrada rápidamente a medida que disminuye la potencia recibida, lo que sugiere que está limitada a realizar relaciones de división mayores a 1:64.
- **XGS-PON clase N2** y **NG-PON2 clase N2** muestran un mejor desempeño del Factor Q, lo que indica una mejor calidad de señal y BER más bajas, especialmente en condiciones de baja potencia que GPON, con XGS-PON presentando un mejor desempeño en el rendimiento desde los -15 hasta los -29 dBm.
- **NG-PON2** tiene un rendimiento ligeramente superior en frecuencias más altas que XGS-PON, debido a su mayor potencia de transmisión, pero a partir de potencias de recepción cercanas a -15 hasta los -29 dBm, presenta un menor Factor Q y mayor BER, por lo que presenta una respuesta a la atenuación ligeramente inferior a XGS-PON, observando que el canal de 187.8 THz presenta el mejor rendimiento ante este escenario.

Esto resalta las ventajas de las tecnologías más recientes de **XGS-PON** y **NG-PON2** frente a **GPON**, especialmente en escenarios que requieren altas tasas de datos, con alta densidad de usuarios asegurando una buena calidad de señal, lo que las convierte en opciones más robustas para futuros despliegues de redes ópticas y por consiguiente de la zona del Centro Histórico de la Ciudad de Cusco.

En la Tabla 26 se puede observar la diferencia del Factor Q de XGS-PON y NG-PON2 con respecto a GPON:

Tabla 26. Diferencia del Factor Q (XGS-PON y NG-PON2 con respecto a GPON)

Prx (dBm)	XGS- PON/GPON	NG-PON2/GPON			
		(187.8 THz)	(187.7 THz)	(187.6 THz)	(187.5 THz)
-16	-	-	-	-	-
-16.5	-	-	-	-	-
-17	4.5102	2.5403	1.3438	2.1258	1.5668
-17.5	4.6787	2.842	1.7268	2.583	2.0113
-18	4.7333	3.0368	1.9833	2.8865	2.3095
-18.5	4.699	3.1307	2.1338	3.0678	2.4912
-19	4.5979	3.1549	2.2037	3.154	2.5826
-19.5	4.4457	3.1247	2.2123	3.1654	2.6028
-20	4.256	3.0536	2.1754	3.1189	2.5681
-20.5	4.04	2.9497	2.102	3.029	2.4922
-21	3.8073	2.8274	2.0036	2.9089	2.3863
-21.5	3.56553	2.68913	1.88833	2.76683	2.25973
-22	3.32074	2.54684	1.76144	2.61024	2.11984
-22.5	3.07786	2.38752	1.62912	2.44565	1.97275
-23	2.84069	2.2336	1.49461	2.27848	1.82303
-23.5	2.61199	2.08037	1.36081	2.1128	1.67426
-24	2.39376	1.92957	1.23018	1.94519	1.52908
-24.5	2.18734	1.78451	1.10471	1.79398	1.38952
-25	1.99308	1.64414	0.98477	1.64478	1.25662
-25.5	1.81143	1.51026	0.87119	1.50301	1.13096
-26	1.64296	1.38364	0.76497	1.37051	1.01676
-26.5	1.48744	1.26511	0.66627	1.24698	0.90457
-27	1.34448	1.15439	0.57519	1.13251	0.80419
-27.5	1.21354	1.05171	0.49142	1.03314	0.71207
-28	1.09397	0.95704	0.41463	0.9301	0.62784
Media	3.058822174	2.229475217	1.440101739	2.211021739	1.749218261

Graficando los resultados de estas diferencias en el Factor Q de la Tabla 26, se obtuvo lo siguiente:

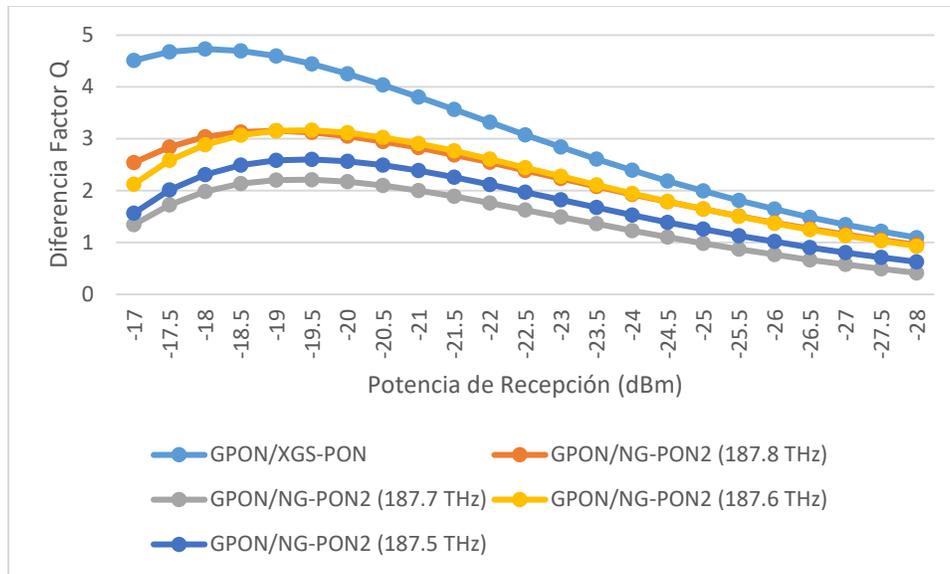


Fig. 95. Diferencia del Factor Q entre XGS-PON y NG-PON2 con respecto a GPON

De la Tabla 26 y la Fig. 95 (XGS-PON/GPON) se puede observar que:

- La mayor diferencia se encuentra en **-18 dBm**, alcanzando un valor de **4.7333**, indicando que **XGS-PON** mantiene una calidad de señal significativamente superior en este punto.
- A medida que la potencia recibida disminuye a partir de los **-20 dBm**, la diferencia se reduce de forma gradual, con una diferencia de **1.09397** a **-28 dBm**, lo que indica que la degradación en ambas tecnologías es más similar en niveles de potencia más bajos.
- En el rango evaluado de **-17 a -28 dBm**, la diferencia promedio del factor Q es de **3.058**.
- **XGS-PON** tiene la mayor diferencia en comparación con **GPON**, lo que lo hace superior en términos de calidad de señal a lo largo del rango de potencia.

De la Tabla 26 y la Fig. 95 (NG-PON2/GPON) se puede observar que:

- A medida que la potencia recibida disminuye, la diferencia en el **Factor Q** se reduce de manera gradual. Esto indica que, a potencias más bajas, **NG-PON2** y **GPON** experimentan una degradación más similar en la calidad de señal.
- Entre potencias de **-19 a -19.5 dBm**, la diferencia del Factor Q es mayor en los 4 canales, y en el rango de **-17 a -28 dBm** se nota lo siguiente:

- Con el canal **187.8 THz** existe una diferencia máxima de **3.1599** en -19 dBm y mínima de **0.957** en -28 dBm, con un promedio de **2.2294**.
- Con el canal **187.7 THz** existe una diferencia máxima de **2.2123** en -19.5 dBm y mínima de **0.4146** en -28 dBm, con un promedio de **1.44**.
- Con el canal **187.6 THz** existe una diferencia máxima de **3.1599** en -19.5 dBm y mínima en de **0.9301** en -28 dBm, con un promedio de **2.211**.
- Con el canal **187.5 THz** existe una diferencia máxima de **2.6028** en -19.5 dBm y mínima en de **0.6278** en -28 dBm, con un promedio de **1.602**.
- La diferencia promedio del Factor Q entre **NG-PON2** y **GPON** es más alta en la frecuencia de **187.8 y 187.6 THz**, y menor con **187.7 y 187.5 THz**.
- **NG-PON2** muestra una clara ventaja sobre **GPON** en términos de **Factor Q**, especialmente en potencias intermedias (**-17 dBm a -20 dBm**) y particularmente en **187.8 THz**, lo que sugiere una mayor capacidad de mantener la calidad de señal.

De la misma manera en la Tabla 27 se puede observar la diferencia del Factor Q de XGS-PON con respecto a NG-PON2:

Tabla 27. Diferencia del Factor Q (XGS-PON con respecto a NG-PON2)

Prx (dBm)	XGS-PON/NG-PON2			
	(187.8 THz)	(187.7 THz)	(187.6 THz)	(187.5 THz)
-15	2.6575	4.3304	4.102	4.499
-15.5	2.4681	3.9758	3.5681	4.0268
-16	2.2795	3.6705	3.1112	3.6158
-16.5	2.1157	3.4036	2.72	3.2573
-17	1.9699	3.1664	2.3844	2.9434
-17.5	1.8367	2.9519	2.0957	2.6674
-18	1.6965	2.75	1.8468	2.4238
-18.5	1.5683	2.5652	1.6312	2.2078
-19	1.443	2.3942	1.4439	2.0153
-19.5	1.321	2.2334	1.2803	1.8429
-20	1.2024	2.0806	1.1371	1.6879
-20.5	1.0903	1.938	1.011	1.5478
-21	0.9799	1.8037	0.8984	1.421
-21.5	0.8764	1.6772	0.7987	1.3058
-22	0.7739	1.5593	0.7105	1.2009
-22.5	0.69034	1.44874	0.63221	1.10511
-23	0.60709	1.34608	0.56221	1.01766
-23.5	0.53162	1.25118	0.49919	0.93773
-24	0.46419	1.16358	0.44857	0.86468
-24.5	0.40283	1.08263	0.39336	0.79782
-25	0.34894	1.00831	0.3483	0.73646
-25.5	0.30117	0.94024	0.30842	0.68047
-26	0.25932	0.87799	0.27245	0.6262
-26.5	0.22233	0.82117	0.24046	0.58287
-27	0.19009	0.76929	0.21197	0.54029
-27.5	0.16183	0.72212	0.1804	0.50147
-28	0.13693	0.67934	0.16387	0.46613
-28.5	0.11492	0.6448	0.1436	0.43388
-29	0.09543	0.55395	0.12567	0.50455
Media	0.993314828	1.855504138	1.14724069	1.602007586

Graficando los resultados de esta diferencia en el Factor Q de la Tabla 27, se obtuvo lo siguiente:

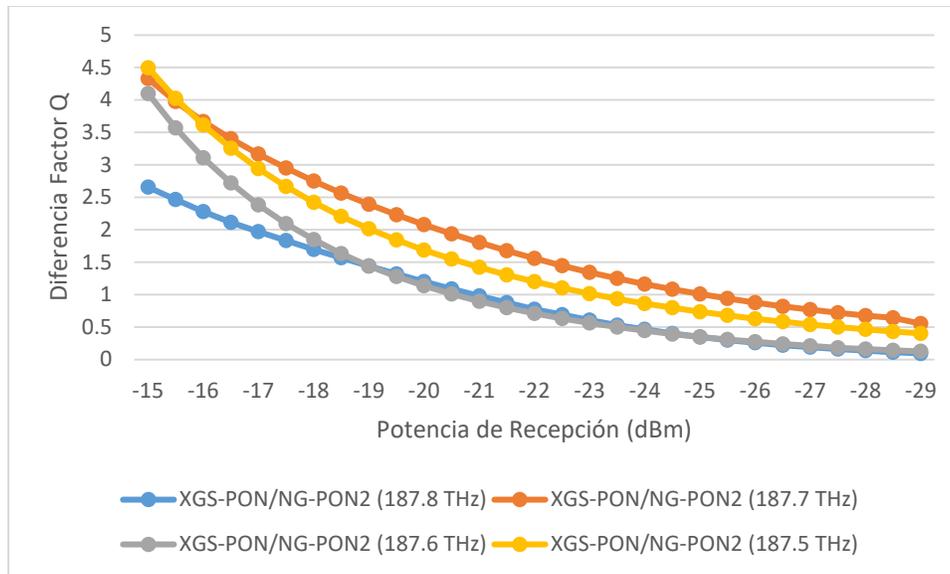


Fig. 96. Diferencia del Factor Q entre XGS-PON con respecto a NG-PON2

De la Tabla 27 y la Fig. 96 (XGS-PON/NG-PON2) se puede observar que:

- La diferencia entre **XGS-PON** y **NG-PON2** muestra un comportamiento fluctuante, con las mayores diferencias observadas entre **-17 dBm** y **-19 dBm**. A estos niveles de potencia, **XGS-PON** tiene un **Factor Q** ligeramente mejor que **NG-PON2**.
- En el rango de potencias de -15 a -29 dBm, la diferencia del Factor Q es mayor en los 4 canales, notando lo siguiente:
 - Con el canal **187.8 THz** existe una diferencia máxima de **2.6575** en **-15 dBm** y mínima de **0.09543** en **-29 dBm**, con un promedio de **1.00065**.
 - Con el canal **187.7 THz** existe una diferencia máxima de **4.3304** en **-15 dBm** y mínima de **0.55395** en **-29 dBm**, con un promedio de **1.8555**.
 - Con el canal **187.6 THz** existe una diferencia máxima de **4.102** en **-15 dBm** y mínima de **0.12567** en **-29 dBm**, con un promedio de **1.1472**.
 - Con el canal **187.5 THz** existe una diferencia máxima de **4.499** en **-15 dBm** y mínima en de **0.6278** en **-28 dBm**, con un promedio de **1.602**.
- Con los canales **187.8** y **187.6 THz** se dio una menor diferencia, en comparación con **187.7** y **187.5 THz**. Y en general las diferencias caen por debajo de **2 dB** en niveles de potencia inferiores a **-24 dBm**.

- **XGS-PON** supera levemente a **NG-PON2** en términos de calidad de señal desde los -15 hasta los -29 dBm, lo que lo convierte en la opción más robusta en la comparación.

Este análisis sugiere que tanto **NG-PON2** como **XGS-PON** son tecnologías avanzadas que ofrecen una mejora sustancial sobre **GPON** en términos de calidad de señal, especialmente en escenarios de potencia moderada a baja.

Haciendo un comparativo de la mejora porcentual de XGS-PON y NG-PON2 con respecto a GPON clase B+, mediante la ecuación:

$$Mejora\ porcentual = \left(\frac{Diferencia\ Factor\ Q}{Factor\ Q_{GPON}} \right) * 100 \quad (5.1)$$

Se obtuvo la Tabla 28:

Tabla 28. Mejora porcentual del Factor Q de XGS-PON y NG-PON2 con respecto a GPON

Prx (dBm)	XGS- PON/GPON	NG-PON2/GPON			
		(187.8 THz)	(187.7 THz)	(187.6 THz)	(187.5 THz)
-16	-	-	-	-	-
-16.5	-	-	-	-	-
-17	17.4796%	9.8451%	5.2080%	8.2387%	6.0723%
-17.5	20.2864%	12.3227%	7.4873%	11.1997%	8.7208%
-18	22.9617%	14.7318%	9.6212%	14.0027%	11.2036%
-18.5	25.5059%	16.9932%	11.5821%	16.6518%	13.5221%
-19	27.9302%	19.1646%	13.3865%	19.1592%	15.6882%
-19.5	30.2272%	21.2455%	15.0419%	21.5222%	17.6970%
-20	32.3929%	23.2413%	16.5572%	23.7383%	19.5461%
-20.5	34.4228%	25.1329%	17.9101%	25.8086%	21.2348%
-21	36.3174%	26.9703%	19.1121%	27.7477%	22.7627%
-21.5	38.0759%	28.7169%	20.1653%	29.5467%	24.1314%
-22	39.6982%	30.4465%	21.0574%	31.2045%	25.3419%
-22.5	41.1873%	31.9493%	21.8005%	32.7272%	26.3989%
-23	42.5469%	33.4541%	22.3858%	34.1263%	27.3047%
-23.5	43.7807%	34.8700%	22.8092%	35.4136%	28.0630%
-24	44.8932%	36.1877%	23.0711%	36.4806%	28.6768%
-24.5	45.8892%	37.4380%	23.1762%	37.6367%	29.1514%
-25	46.7577%	38.5716%	23.1027%	38.5866%	29.4803%
-25.5	47.5003%	39.6029%	22.8448%	39.4128%	29.6567%
-26	48.1383%	40.5403%	22.4134%	40.1556%	29.7908%
-26.5	48.6753%	41.3997%	21.8032%	40.8065%	29.6014%
-27	49.1161%	42.1718%	21.0127%	41.3725%	29.3784%
-27.5	49.4644%	42.8681%	20.0305%	42.1112%	29.0243%
-28	49.7221%	43.4985%	18.8454%	42.2740%	28.5360%
Media	38.3900%	30.0593%	18.2793%	29.9967%	23.0862%

Graficando los resultados de la Tabla 28 se tiene lo siguiente:

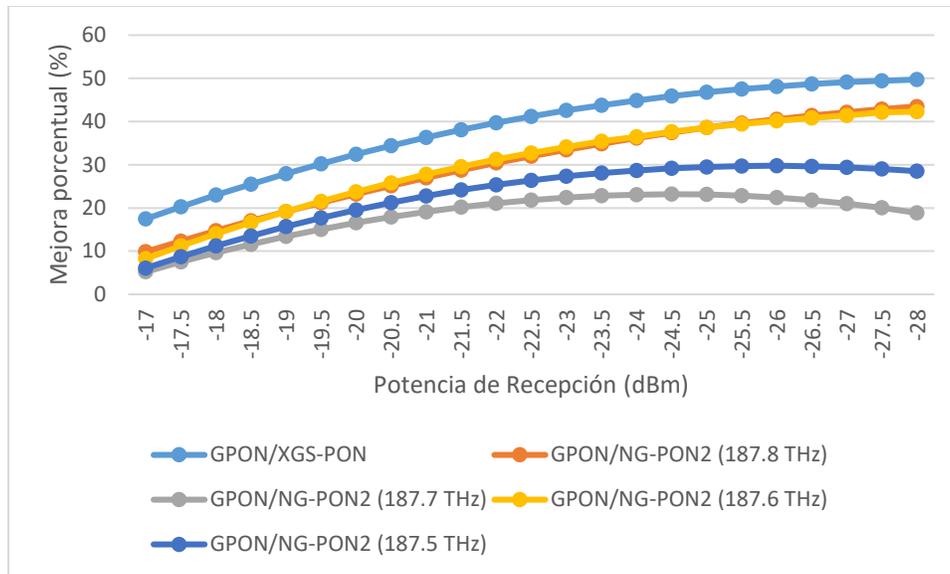


Fig. 97. Mejora porcentual del Factor Q con respecto a GPON

De la Tabla 28 y Fig. 97 se puede observar que:

- XGS-PON tiene una mejora porcentual promedio del **38.39 %** sobre GPON.
- NG-PON2 (187.8 THz) tiene una mejora porcentual promedio del **30.05 %** sobre GPON.
- NG-PON2 (187.7 THz) tiene una mejora porcentual promedio del **18.28 %** sobre GPON.
- NG-PON2 (187.6 THz) tiene una mejora porcentual promedio del **29.99 %** sobre GPON.
- NG-PON2 (187.5 THz) tiene una mejora porcentual promedio del **23.08 %** sobre GPON.

A medida que la potencia recibida disminuye, las mejoras porcentuales tanto de XGS-PON como de NG-PON2 con respecto a GPON tienden a aumentar. XGS-PON muestra una mejora porcentual en comparación con NG-PON2 para la mayoría de los valores de Prx, lo que indica que XGS-PON es más eficiente que NG-PON2 y GPON en el rango de potencias de recepción evaluadas.

De la misma manera se obtuvo la mejora porcentual de XGS-PON con respecto NG-PON2, como se observa en la Tabla 29:

Tabla 29. Mejora porcentual del Factor Q de XGS-PON con respecto a NG-PON2

Prx (dBm)	XGS-PON/NG-PON2			
	(187.8 THz)	(187.7 THz)	(187.6 THz)	(187.5 THz)
-15	6.6747%	11.3534%	10.6906%	11.8478%
-15.5	6.7301%	11.3061%	10.0304%	11.4678%
-16	6.7586%	11.3510%	9.4578%	11.1629%
-16.5	6.8358%	11.4745%	8.9633%	10.9274%
-17	6.9502%	11.6642%	8.5375%	10.7543%
-17.5	7.0901%	11.9076%	8.1716%	10.6379%
-18	7.1731%	12.1696%	7.8586%	10.5735%
-18.5	7.2762%	12.4785%	7.5902%	10.5564%
-19	7.3559%	12.8267%	7.3608%	10.5819%
-19.5	7.4079%	13.1998%	7.1633%	10.6462%
-20	7.4258%	13.5862%	6.9943%	10.7463%
-20.5	7.4240%	14.0045%	6.8471%	10.8781%
-21	7.3617%	14.4446%	6.7083%	11.0414%
-21.5	7.2710%	14.9050%	6.5839%	11.2337%
-22	7.0923%	15.3984%	6.4737%	11.4537%
-22.5	7.0012%	15.9168%	6.3741%	11.6997%
-23	6.8134%	16.4734%	6.2781%	11.9730%
-23.5	6.6069%	17.0766%	6.1790%	12.2734%
-24	6.3923%	17.7313%	6.1640%	12.6025%
-24.5	6.1491%	18.4394%	5.9958%	12.9598%
-25	5.9075%	19.2156%	5.8960%	13.3436%
-25.5	5.6571%	20.0704%	5.8012%	13.7622%
-26	5.4063%	21.0148%	5.6956%	14.1362%
-26.5	5.1454%	22.0619%	5.5884%	14.7174%
-27	4.8844%	23.2236%	5.4775%	15.2558%
-27.5	4.6170%	24.5220%	5.1742%	15.8421%
-28	4.3371%	25.9806%	5.2350%	16.4826%
-28.5	4.0399%	27.8563%	5.0995%	17.1789%
-29	3.7219%	26.3100%	4.9598%	17.9412%
Media	6.3278%	16.8263%	6.8741%	12.5751%

Graficando los resultados de la Tabla 29 se tiene lo siguiente:

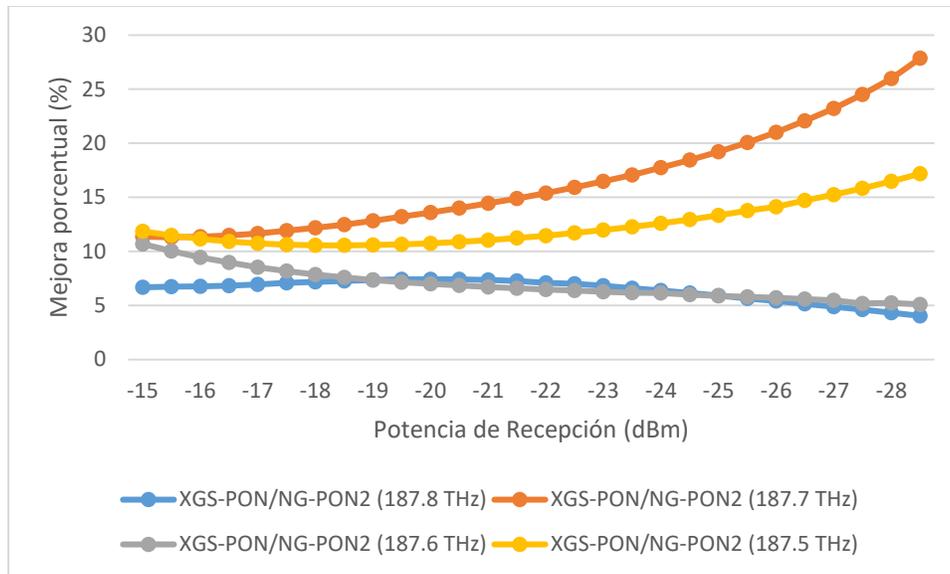


Fig. 98. Mejora porcentual del Factor Q de XGS-PON con respecto a NG-PON2

De la Tabla 29 y Fig. 98 se puede observar lo siguiente:

- XGS-PON tiene una mejora porcentual promedio de **6.33 %** sobre NG-PON2 (187.8 THz).
- XGS-PON tiene una mejora porcentual promedio de **16.82 %** sobre NG-PON2 (187.7 THz).
- XGS-PON tiene una mejora porcentual promedio de **6.87 %** sobre NG-PON2 (187.6 THz).
- XGS-PON tiene una mejora porcentual promedio de **12.57 %** sobre NG-PON2 (187.5 THz).

XGS-PON presenta una mejora porcentual del Factor Q en comparación con NG-PON2, especialmente a las frecuencias de 187.7 THz y 187.5 THz. En las frecuencias 187.8 THz y 187.6 THz, aunque XGS-PON sigue mostrando mejoras, la diferencia porcentual no es tan marcada, lo que indica una menor ventaja en estos casos, por lo que XGS-PON demuestra ser más eficiente que NG-PON2, en el rango de potencias de recepción evaluadas.

En conclusión, mediante el análisis a diferentes potencias de recepción, XGS-PON es más robusto a los efectos de atenuación y por ende un mejor rendimiento, superior a GPON en el rango de -17 a -28 dBm y levemente superior a NG-PON2 en el rango de -15 a -29 dBm, bajo las mismas

condiciones de la ODN del usuario más lejano. Por lo que es de esperar un desempeño del rendimiento similar con los demás usuarios de toda la red, que se encuentran en el Centro Histórico de la Ciudad del Cusco.

5.2.2. Relación entre el Factor Q y la potencia de recepción

Una característica importante de los gráficos obtenidos del Factor Q en función de la potencia de recepción de las tres tecnologías, es su correlación exponencial, por lo que, se pudo estimar y modelar una ecuación que relaciona estas variables. Para ello, la estimación se realizó mediante el método de regresión exponencial y el coeficiente de determinación R^2 [57]. La ecuación característica a un ajuste de regresión exponencial está dada por la siguiente expresión:

$$y = Ae^{Bx} \quad (5.2)$$

$$0 \leq R^2 \leq 1 \quad (5.3)$$

Donde y viene a ser el Factor Q y x la potencia de recepción en dBm; A y B los parámetros que definen la función exponencial como el valor inicial y la tasa de crecimiento o decrecimiento respectivamente.

En cuanto al coeficiente de determinación R^2 , es el parámetro que nos indica el ajuste de la curva estimada con respecto a la curva de los datos obtenidos, si su valor es aproximadamente o es igual a 1, entonces el ajuste es casi perfecto y muy fiable, mientras que un valor cercano o igual 0, nos indica que la curva estimada no logra modelar a la curva de los datos obtenidos, también se suele representar en porcentaje.

Para simplificar la obtención de las curvas características de cada tecnología, se hizo uso de herramientas de estadística descriptiva y análisis de datos que nos brindaron softwares como Excel y Python. En los gráficos siguientes se pueden observar las ecuaciones de ajuste del Factor Q en función de la potencia de recepción en dBm y el coeficiente de determinación, que se obtuvo en el

rango de -17 dBm ~ -28 dBm para GPON y en el rango de -15 dBm ~ -29 dBm para XGS-PON y NG-PON2:

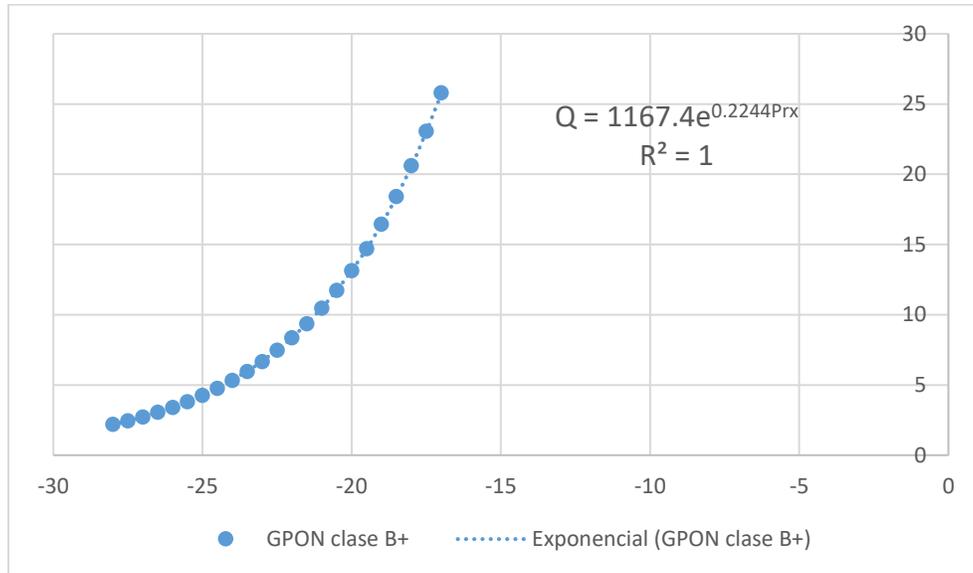


Fig. 99. Curva exponencial estimada (GPON)

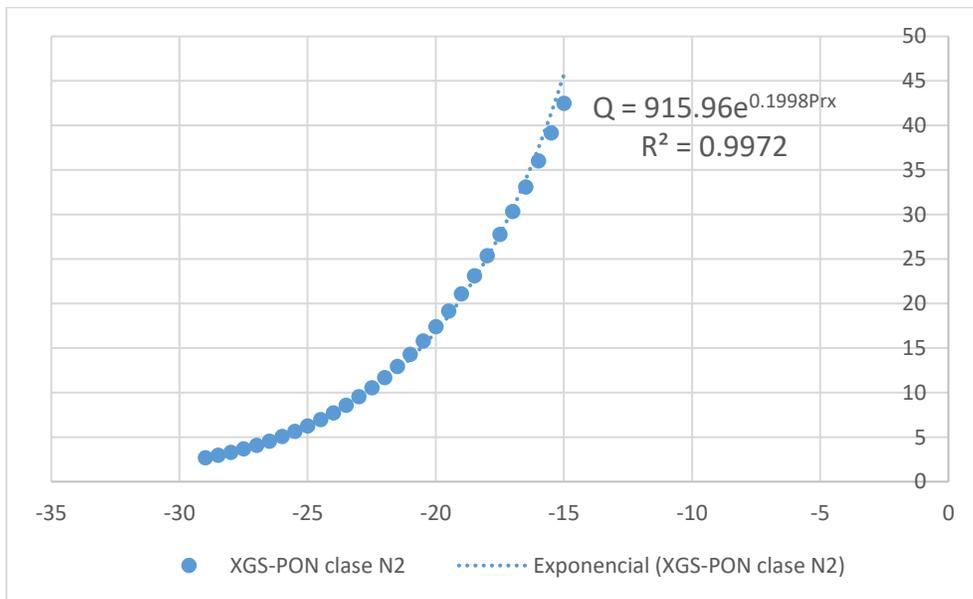


Fig. 100. Curva exponencial estimada (XGS-PON)

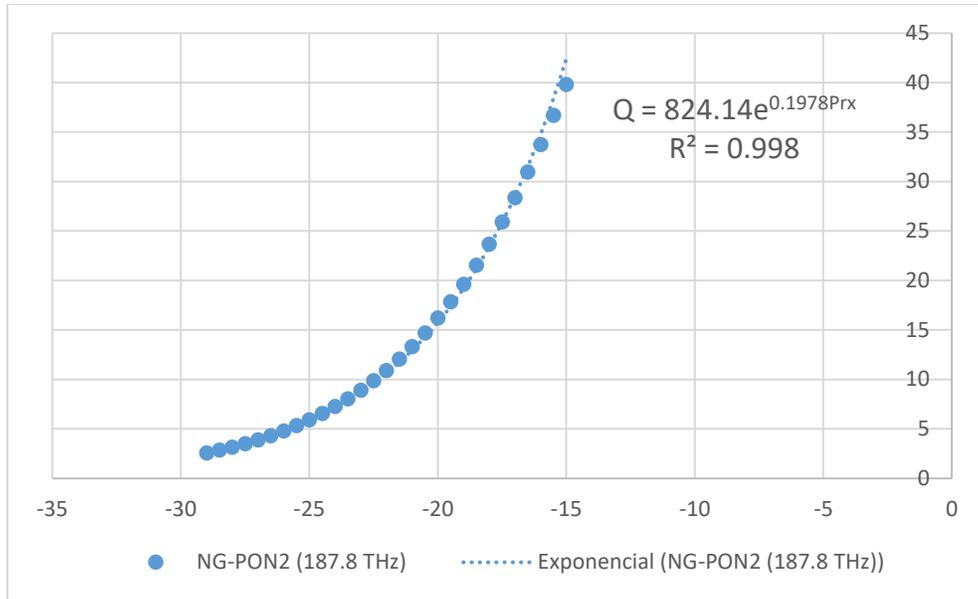


Fig. 101. Curva exponencial estimada (NG-PON2 187.8 THz)

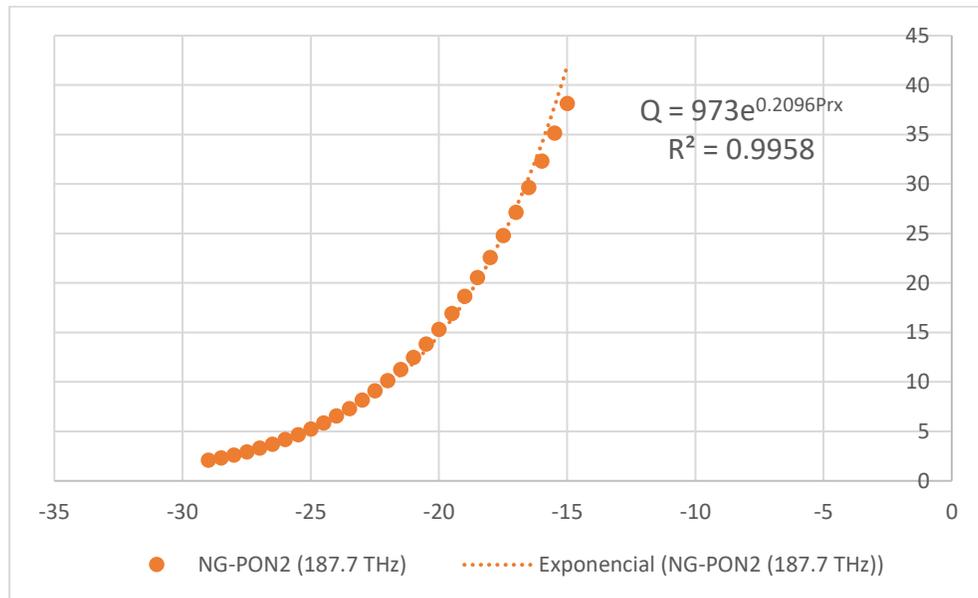


Fig. 102. Curva exponencial estimada (NG-PON2 187.7 THz)

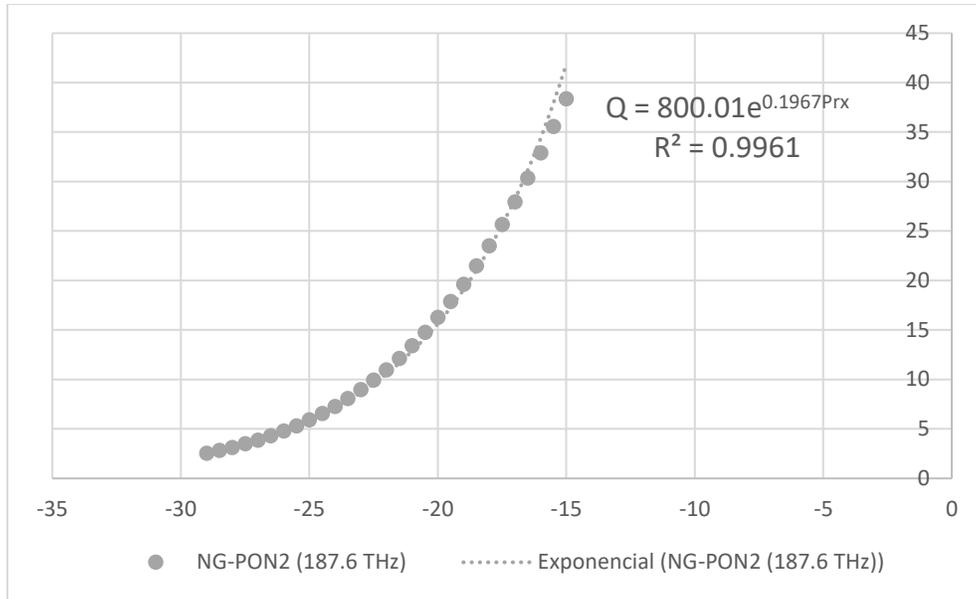


Fig. 103. Curva exponencial estimada (NG-PON2 187.7 THz)

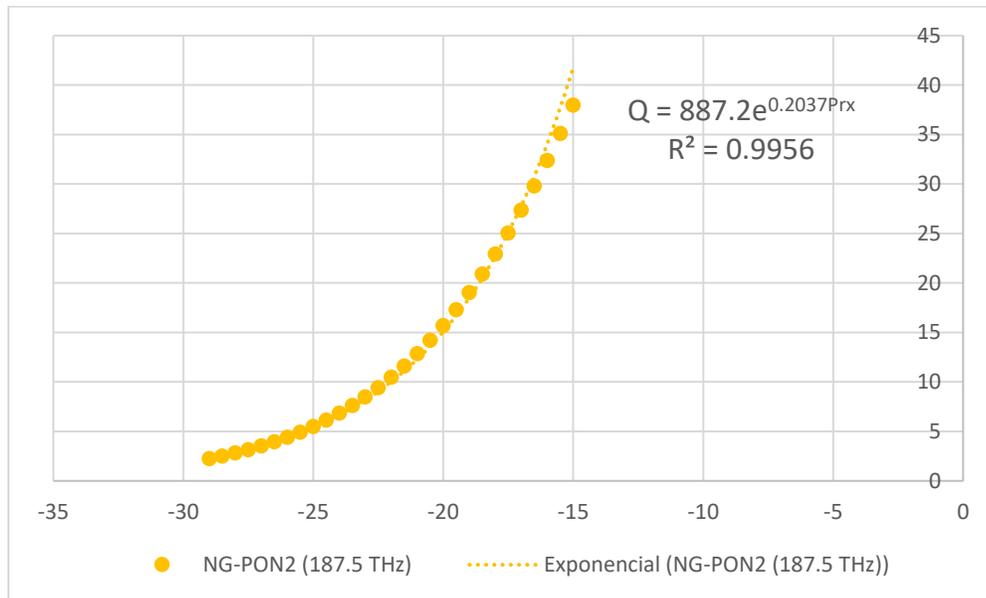


Fig. 104. Curva exponencial estimada (NG-PON2 187.6 THz)

Como se puede observar de los gráficos anteriores, el coeficiente de determinación es mayor al 0.995, lo que indica que las ecuaciones exponenciales estimadas, presentan un ajuste casi perfecto, en los rangos de potencia de recepción establecidos para cada tecnología.

Se puede observar que GPON presentó un coeficiente de determinación igual a 1, lo que significa un ajuste teóricamente perfecto, con respecto a XGS-PON y NG-PON2, que presentaron un ajuste menor pero que son muy fiables. Esta diferencia se pudo dar debido a que la línea de tendencia exponencial para GPON se ajusta perfectamente a sus datos obtenidos en el rango establecido, como se puede observar en la Fig. 99. En el caso de las otras tecnologías, las líneas de tendencia exponencial, se ajustaron mejor en el rango de potencias de recepción de -29 dBm ~ -16.5 dBm aproximadamente, con respecto a las curvas de los datos obtenidos, como observa en las figuras anteriores, y que a partir de -16.5 dBm ~ -15 dBm, se puede notar una mayor diferencia entre la línea de tendencia en comparación con los datos obtenidos, por lo que se podría decir que la técnica de regresión exponencial, se ajusta mejor para un menor rango de evaluación de potencias de recepción.

Para visualizar con mayor detalle esta diferencia entre los datos obtenidos y las ecuaciones estimadas, se realizó un comparativo de los valores del Factor Q, calculando el error porcentual en cada tecnología mediante la ecuación (5.1):

$$Error\ porcentual\ (\%) = \left(\frac{|Q_{Datos\ optisystem} - Q_{Ec.\ estimadas}|}{Q_{Datos\ optisystem}} \right) * 100\ \% \quad (5.1)$$

En las siguientes tablas se observan los resultados obtenidos:

Tabla 30. Error entre datos obtenidos y ecuación estimada (GPON)

Potencia de recepción Prx (dBm)	Factor Q (datos obtenidos en Optisystem)	Factor Q Ec. exponencial Q = $1167.3e^{0.2244Prx}$	Error absoluto	Error porcentual (%)
-17	25.8026	25.73197373	0.070626267	0.27372%
-17.5	23.0632	23.00092271	0.062277294	0.27003%
-18	20.6139	20.55973051	0.054169495	0.26278%
-18.5	18.4232	18.3776331	0.0455669	0.24733%
-19	16.4621	16.42713158	0.034968416	0.21242%
-19.5	14.7076	14.68364564	0.023954363	0.16287%
-20	13.1387	13.12520376	0.013496242	0.10272%
-20.5	11.7364	11.73216638	0.00423362	0.03607%
-21	10.4834	10.48697837	0.003578375	0.03413%
-21.5	9.36427	9.373947818	0.009677818	0.10335%
-22	8.36496	8.379048239	0.014088239	0.16842%
-22.5	7.47284	7.489741863	0.016901863	0.22618%
-23	6.67661	6.694821605	0.018211605	0.27277%
-23.5	5.96607	5.984269837	0.018199837	0.30506%
-24	5.33212	5.34913215	0.01701215	0.31905%
-24.5	4.76657	4.781404505	0.014834505	0.31122%
-25	4.26257	4.273932368	0.011362368	0.26656%
-25.5	3.81351	3.82032055	0.00681055	0.17859%
-26	3.413	3.414852611	0.001852611	0.05428%
-26.5	3.05584	3.052418822	0.003421178	0.11196%
-27	2.73735	2.728451775	0.008898225	0.32507%
-27.5	2.45336	2.438868818	0.014491182	0.59067%
-28	2.20017	2.180020614	0.020149386	0.91581%
Media	-	-	0.021251413	0.25005%

Tabla 31. Error entre datos obtenidos y ecuación estimada (XGS-PON)

Potencia de recepción Prx (dBm)	Factor Q (datos obtenidos en Optisystem)	Factor Q Ec. exponencial Q = $915.5e^{0.1998Prx}$	Error absoluto	Error porcentual (%)
-15	42.4722	45.7399775	3.26777745	7.69392%
-15.5	39.1408	41.391382	2.250582028	5.74996%
-16	36.0069	37.4562167	1.449316678	4.02511%
-16.5	33.0659	33.8951757	0.829275736	2.50795%
-17	30.3128	30.6726904	0.359890413	1.18726%
-17.5	27.7419	27.7565735	0.014673516	0.05289%
-18	25.3472	25.117698	0.229502042	0.90543%
-18.5	23.1222	22.7297058	0.392494176	1.69748%
-19	21.06	20.5687451	0.491254898	2.33264%
-19.5	19.1533	18.6132314	0.540068559	2.81972%
-20	17.3947	16.8436326	0.551067443	3.16802%
-20.5	15.7764	15.2422731	0.534126856	3.38561%
-21	14.2907	13.7931583	0.497541676	3.48158%
-21.5	12.9298	12.4818139	0.447986117	3.46476%
-22	11.6857	11.2951417	0.390558296	3.34219%
-22.5	10.5507	10.2212889	0.329411066	3.12217%
-23	9.5173	9.24952959	0.267770405	2.81351%
-23.5	8.57806	8.37015745	0.20790255	2.42365%
-24	7.72588	7.57438906	0.151490943	1.96082%
-24.5	6.95391	6.85427603	0.099633969	1.43278%
-25	6.25565	6.20262566	0.053024342	0.84762%
-25.5	5.62494	5.61292905	0.01201095	0.21353%
-26	5.05596	5.07929613	0.023336134	0.46156%
-26.5	4.54328	4.59639682	0.053116816	1.16913%
-27	4.08183	4.15940775	0.077577747	1.90056%
-27.5	3.6669	3.76396414	0.097064144	2.64704%
-28	3.29414	3.40611619	0.111976192	3.39925%
-28.5	2.95954	3.08228959	0.122749594	4.14759%
-29	2.65942	2.78924987	0.129829869	4.88189%
Media	-	-	0.482172779	2.66330%

Tabla 32. Error entre datos obtenidos y ecuación estimada (NG-PON2 187.8 THz)

Potencia de recepción Prx (dBm)	Factor Q (datos obtenidos en Optisystem)	Factor Q Ec. exponencial Q = $824.14e^{0.1978Prx}$	Error absoluto	Error porcentual (%)
-15	39.8147	42.40814396	2.593443963	6.51379%
-15.5	36.6727	38.41470843	1.742008434	4.75015%
-16	33.7274	34.7973216	1.069921603	3.17226%
-16.5	30.9502	31.5205722	0.5703722	1.84287%
-17	28.3429	28.55238352	0.209483519	0.73910%
-17.5	25.9052	25.86369941	0.041500591	0.16020%
-18	23.6507	23.42819985	0.222500154	0.94078%
-18.5	21.5539	21.22204327	0.33185673	1.53966%
-19	19.617	19.22363321	0.393366791	2.00523%
-19.5	17.8323	17.41340685	0.418893146	2.34907%
-20	16.1923	15.77364357	0.418656435	2.58553%
-20.5	14.6861	14.2882914	0.397808604	2.70874%
-21	13.3108	12.94280996	0.367990042	2.76460%
-21.5	12.0534	11.72402809	0.329371915	2.73261%
-22	10.9118	10.6200149	0.291785105	2.67403%
-22.5	9.86036	9.619962999	0.240397001	2.43801%
-23	8.91021	8.714082702	0.196127298	2.20115%
-23.5	8.04644	7.893506176	0.152933824	1.90064%
-24	7.26169	7.150200644	0.111489356	1.53531%
-24.5	6.55108	6.476889751	0.074190249	1.13249%
-25	5.90671	5.866982331	0.039727669	0.67259%
-25.5	5.32377	5.314507889	0.009262111	0.17398%
-26	4.79664	4.814058149	0.017418149	0.36313%
-26.5	4.32095	4.360734116	0.039784116	0.92073%
-27	3.89174	3.950098117	0.058358117	1.49954%
-27.5	3.50507	3.578130361	0.073060361	2.08442%
-28	3.15721	3.241189585	0.083979585	2.65993%
-28.5	2.84462	2.935977415	0.091357415	3.21159%
-29	2.56399	2.659506072	0.095516072	3.72529%
Media	-	-	0.368364157	2.13784%

Tabla 33. Error entre datos obtenidos y ecuación estimada (NG-PON2 187.7 THz)

Potencia de recepción Prx (dBm)	Factor Q (datos obtenidos en Optisystem)	Factor Q Ec. exponencial Q = $973e^{0.2096Prx}$	Error absoluto	Error porcentual (%)
-15	38.1418	41.94604217	3.804242174	9.97395%
-15.5	35.165	37.77260416	2.60760416	7.41534%
-16	32.3364	34.01440401	1.678004008	5.18921%
-16.5	29.6623	30.63012746	0.967827462	3.26282%
-17	27.1464	27.58257085	0.436170847	1.60674%
-17.5	24.79	24.83823208	0.048232079	0.19456%
-18	22.5972	22.36694238	0.23025762	1.01897%
-18.5	20.557	20.14153462	0.415465376	2.02104%
-19	18.6658	18.13754469	0.52825531	2.83007%
-19.5	16.9199	16.33294253	0.586957474	3.46904%
-20	15.3141	14.70788997	0.606210034	3.95851%
-20.5	13.8384	13.24452265	0.593877348	4.29152%
-21	12.487	11.92675365	0.560246355	4.48664%
-21.5	11.2526	10.74009659	0.512503414	4.55453%
-22	10.1264	9.67150644	0.45489356	4.49215%
-22.5	9.10196	8.709236091	0.392723909	4.31472%
-23	8.17122	7.84270721	0.32851279	4.02036%
-23.5	7.32688	7.062393962	0.264486038	3.60980%
-24	6.5623	6.359718289	0.202581711	3.08705%
-24.5	5.87128	5.726955609	0.144324391	2.45814%
-25	5.24734	5.157149901	0.090190099	1.71878%
-25.5	4.6847	4.644037237	0.040662763	0.86799%
-26	4.17797	4.18197692	0.00400692	0.09591%
-26.5	3.72211	3.765889477	0.043779477	1.17620%
-27	3.31254	3.391200818	0.078660818	2.37464%
-27.5	2.94478	3.053791955	0.109011955	3.70187%
-28	2.6148	2.749953719	0.135153719	5.16880%
-28.5	2.31474	2.476345989	0.161605989	6.98160%
-29	2.10547	2.229960968	0.124490968	5.91274%
Media	-	-	0.556928923	3.59495%

Tabla 34. Error entre datos obtenidos y ecuación estimada (NG-PON2 187.6 THz)

Potencia de recepción Prx (dBm)	Factor Q (datos obtenidos en Optisystem)	Factor Q Ec. exponencial Q = $800.01e^{0.1967Prx}$	Error absoluto	Error porcentual (%)
-15	38.3702	41.85135724	3.481157245	9.07255%
-15.5	35.5727	37.93120892	2.35850892	6.63011%
-16	32.8957	34.37825449	1.48255449	4.50683%
-16.5	30.3459	31.1580995	0.812199503	2.67647%
-17	27.9284	28.23957118	0.311171178	1.11417%
-17.5	25.6462	25.59441664	0.051783363	0.20191%
-18	23.5004	23.19702941	0.303370595	1.29092%
-18.5	21.491	21.02420152	0.466798478	2.17206%
-19	19.6161	19.05489888	0.56120112	2.86092%
-19.5	17.873	17.2700576	0.602942397	3.37348%
-20	16.2576	15.65239949	0.605200505	3.72257%
-20.5	14.7654	14.18626478	0.579135219	3.92225%
-21	13.3923	12.85746051	0.534839486	3.99363%
-21.5	12.1311	11.65312317	0.477976827	3.94009%
-22	10.9752	10.56159415	0.413605855	3.76855%
-22.5	9.91849	9.57230686	0.34618314	3.49028%
-23	8.95509	8.6756845	0.2794055	3.12007%
-23.5	8.07887	7.863047293	0.215822707	2.67145%
-24	7.27731	7.126528487	0.150781513	2.07194%
-24.5	6.56055	6.458998195	0.101551805	1.54792%
-25	5.90735	5.853994376	0.053355624	0.90321%
-25.5	5.31652	5.305660278	0.010859722	0.20426%
-26	4.78351	4.808687739	0.025177739	0.52634%
-26.5	4.30282	4.358265807	0.055445807	1.28859%
-27	3.86986	3.950034162	0.080174162	2.07176%
-27.5	3.4865	3.58004091	0.09354091	2.68295%
-28	3.13027	3.244704321	0.114434321	3.65573%
-28.5	2.81594	2.940778163	0.124838163	4.43327%
-29	2.53375	2.665320272	0.131570272	5.19271%
Media	-	-	0.511227123	3.00369%

Tabla 35. Error entre datos obtenidos y ecuación estimada (NG-PON2 187.5 THz)

Potencia de recepción Prx (dBm)	Factor Q (datos obtenidos en Optisystem)	Factor Q Ec. exponencial Q = $898.09e^{0.2044Prx}$	Error absoluto	Error porcentual (%)
-15	37.9732	41.85747043	3.884270434	10.22898%
-15.5	35.114	37.79097381	2.676973809	7.62367%
-16	32.3911	34.11954155	1.728441545	5.33616%
-16.5	29.8086	30.80479273	0.99619273	3.34196%
-17	27.3694	27.8120752	0.442675197	1.61741%
-17.5	25.0745	25.11010327	0.035603273	0.14199%
-18	22.9234	22.67063072	0.252769278	1.10267%
-18.5	20.9144	20.46815546	0.446244544	2.13367%
-19	19.0447	18.47965294	0.565047055	2.96695%
-19.5	17.3104	16.68433551	0.626064487	3.61670%
-20	15.7068	15.06343503	0.64336497	4.09609%
-20.5	14.2286	13.60000671	0.628593292	4.41782%
-21	12.8697	12.27875196	0.590948036	4.59178%
-21.5	11.624	11.08585849	0.538141512	4.62957%
-22	10.4848	10.00885585	0.475944151	4.53937%
-22.5	9.44559	9.036485132	0.409104868	4.33117%
-23	8.49964	8.158581238	0.341058762	4.01263%
-23.5	7.64033	7.365966617	0.274363383	3.59099%
-24	6.8612	6.650355328	0.210844672	3.07300%
-24.5	6.15609	6.004266417	0.151823583	2.46623%
-25	5.51919	5.420945713	0.098244287	1.78005%
-25.5	4.94447	4.89429522	0.05017478	1.01477%
-26	4.42976	4.418809368	0.010950632	0.24721%
-26.5	3.96041	3.989517459	0.029107459	0.73496%
-27	3.54154	3.601931704	0.060391704	1.70524%
-27.5	3.16543	3.252000307	0.086570307	2.73487%
-28	2.82801	2.936065107	0.108055107	3.82089%
-28.5	2.52566	2.65082334	0.12516334	4.95567%
-29	2.15487	2.393293106	0.238423106	6.13885%
Media	-	-	0.576743114	3.48246%

De acuerdo con las tablas anteriores se tiene que:

- En GPON se puede observar que el error porcentual es menor al 1 % en el rango establecido, con un error total promedio del Factor Q de **0.2497 %**, lo que indica un ajuste perfecto.
- En el caso de XGS-PON, se puede apreciar un error porcentual mayor a 5 % en el rango de -15.5 a -15 dBm, un error menor al 5 % en el rango de -16 a -28.5 dBm y un error total promedio del **2.6633 %**, lo que indica un ajuste confiable.
- En la tecnología NG-PON2 para el canal 187.8 THz, se tiene un error porcentual mayor al 4 % en -15.5 a -15 dBm, un error menor al 4 % en -16 a -29 dBm y un error porcentual promedio **2.1378 %**, indicando un ajuste confiable.
- Para el canal 187.7 THz, se tiene un error porcentual mayor al 5 % en -15 a -16 dBm, un error menor al 5 % en -16.5 a -27.5 dBm, un error mayor al 5 % en -28 a 29 dBm y un error total promedio de **3.59495 %**.
- Para el canal 187.6 THz, se tiene un error porcentual mayor al 4 % en -15 a -15.5 dBm, un error menor al 5 % en -16 a -28 dBm, un error mayor al 5 % en -29 dBm y un error total promedio de **3.0037 %**.
- Para el canal 187.5 THz, se tiene un error porcentual mayor al 5 % en -15 a -16 dBm, un error menor al 5 % en -16.5 a -28.5 dBm, un error mayor al 5 % en -29 dBm y un error total promedio de **3.4825 %**.

En la Tabla 36, se observa un resumen de los datos obtenidos:

Tabla 36. Datos obtenidos mediante regresión exponencial

Parámetro	GPON clase B+	XGS-PON clase N2	NG-PON2 (187.8 THz)	NG-PON2 (187.7 THz)	NG-PON2 (187.6 THz)	NG-PON2 (187.5 THz)
Ecuación estimada	$Q = 1167.4e^{0.2244Prx}$	$Q = 915.96e^{0.1998Prx}$	$Q = 824.14e^{0.1978Prx}$	$Q = 973.0e^{0.2096Prx}$	$Q = 800.01e^{0.1967Prx}$	$Q = 898.09e^{0.2044Prx}$
R ²	1	0.9972	0.998	0.9958	0.9961	0.9954
R ² (%)	100%	99.72%	99.8%	99.58%	99.61%	99.54%
E% (Media)	0.25005%	2.66330%	2.13784%	3.59495%	3.00369%	3.48246%

5.3. Análisis comparativo de las tecnologías PON con relaciones de 1:128 y 1:256

En el apartado 5.2, se pudo observar y analizar el rendimiento de las tecnologías PON en el rango de potencias de recepción establecidas, a partir de la ODN actual de GPON con el usuario más lejano y una relación de división 1:64, obteniendo una mejora en el Factor Q y menor BER de las tecnologías PON de nueva generación con respecto a GPON.

De acuerdo a las potencias de recepción, que se obtuvo en el apartado 4.2 de simulación del capítulo IV, se pudo verificar que las potencias de recepción de las tecnologías PON de nueva generación de clase N2, son de mayor valor en comparación a GPON clase B+ y por consiguiente un mejor rendimiento, debido a que operan con una potencia de transmisión mayor.

Es por ello que, conforme a estos resultados se logró comprobar también el por qué estas nuevas tecnologías, pueden soportar mayor cantidad de usuarios, realizando un cambio en el splitter de 1x8 de segundo nivel por splitters de 1x16 o 1x32, lo que conlleva a obtener relaciones máximas por puerto de 1:128 o 1:256 respectivamente. En la Fig. 105, se observa este cambio:

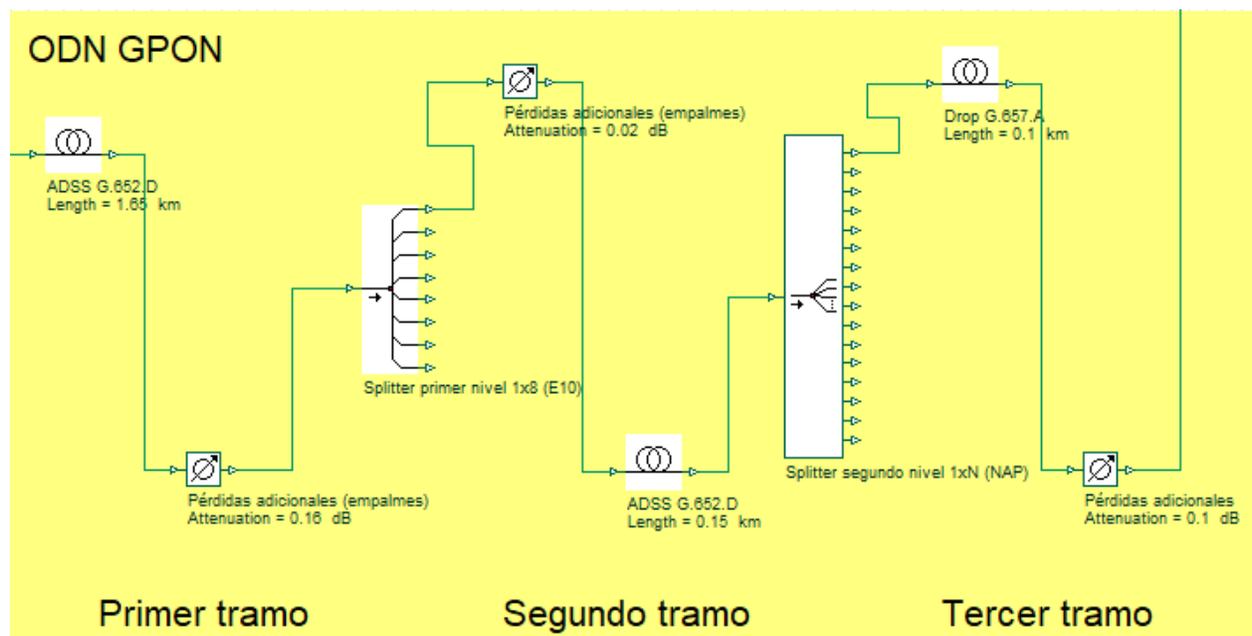


Fig. 105. ODN con cambio de splitter de segundo nivel

Al realizar este cambio en la caja NAP, se configuró el splitter para cada caso, primero para 1x16 con una pérdida por defecto de 12.041 dB agregando 1.75 dB para obtener 13.791 dB; y segundo para 1x32 con una pérdida por defecto 15.051 dB agregando 1.94 dB para obtener 16.991 dB.

5.3.1. Resultados para divisiones de 1:128 y 1:256

Se tiene los resultados del diagrama de ojo, así mismo del Factor Q y la BER para relaciones de división de 1:128 y 1:256 por puerto para:

- GPON clase B+:

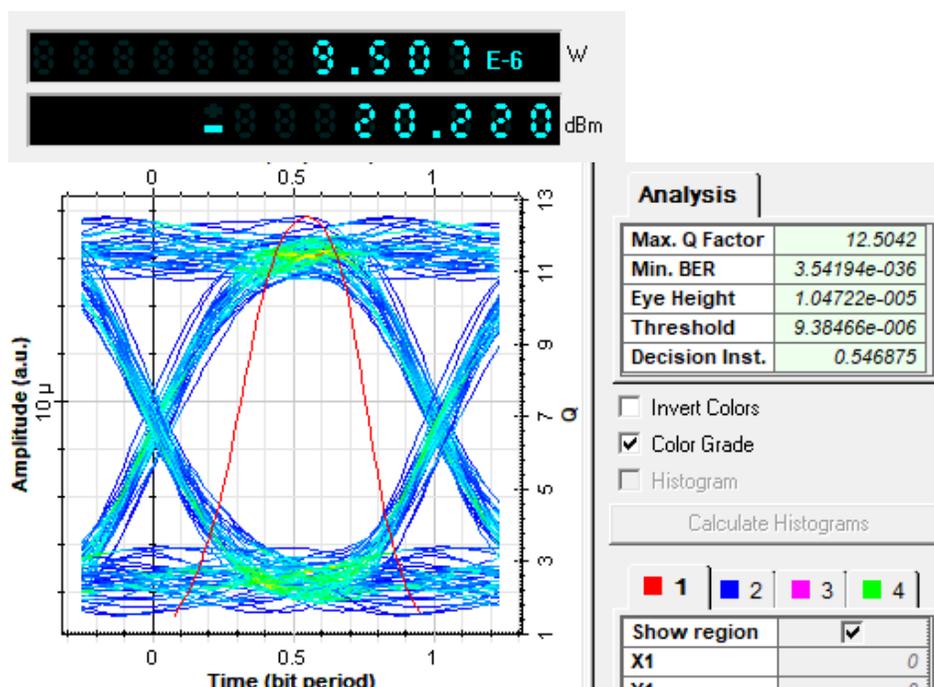


Fig. 106. Potencia recibida y diagrama de ojo para una división de 1:128

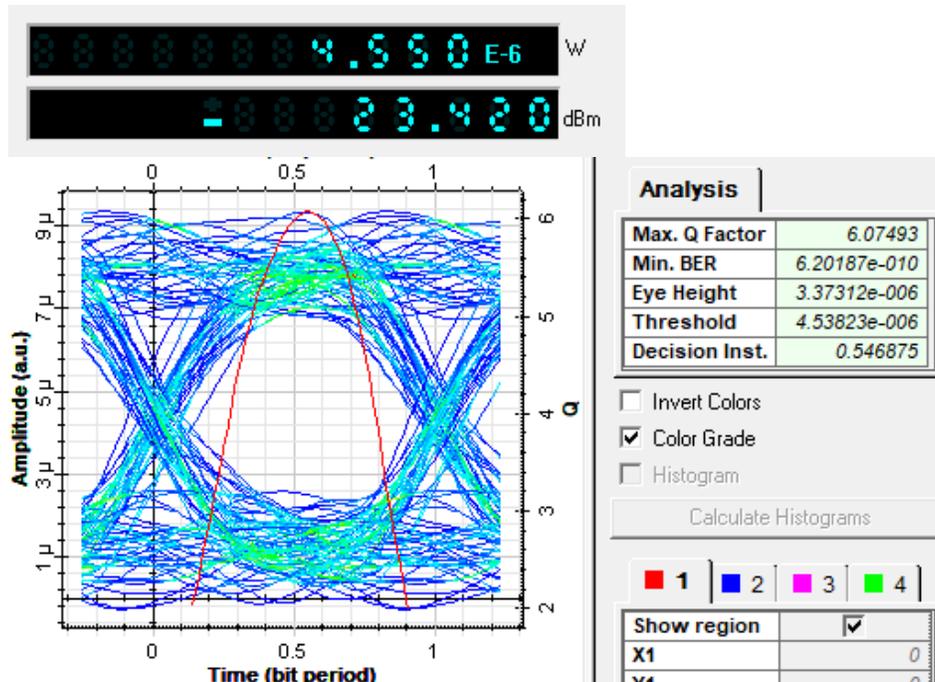


Fig. 107. Potencia recibida y diagrama de ojo para una división de 1:256

- XGS-PON clase N2:

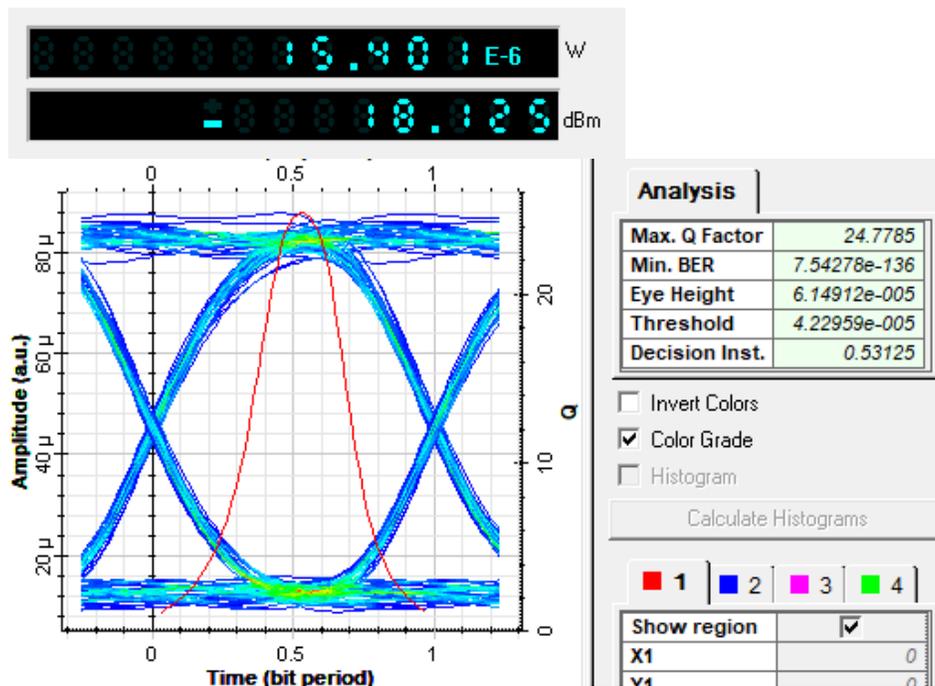


Fig. 108. Potencia recibida y diagrama de ojo para una división de 1:128

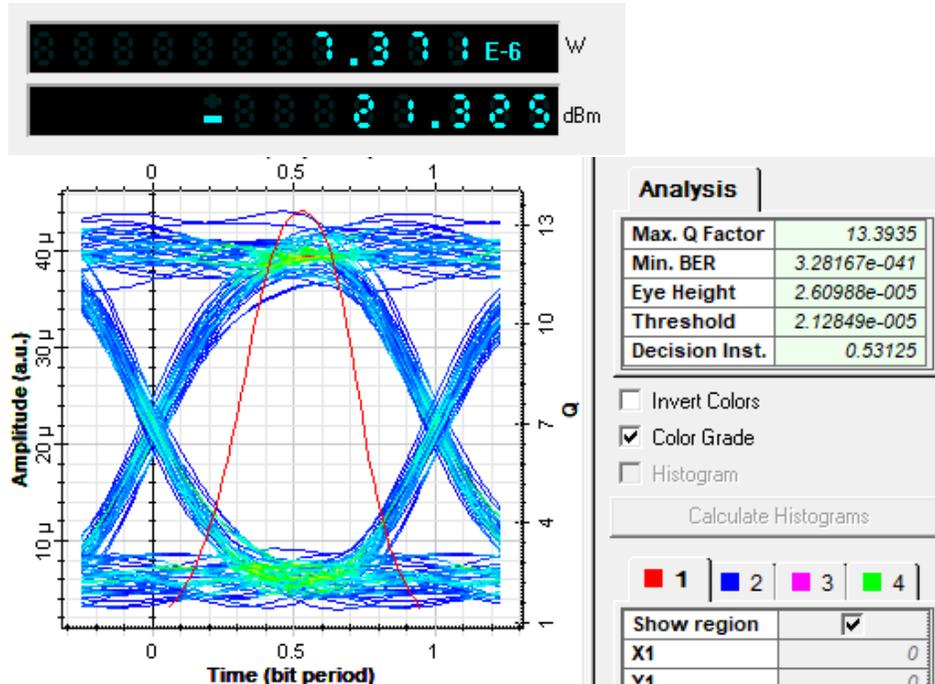


Fig. 109. Potencia recibida y diagrama de ojo para una división de 1:256

- NG-PON clase N2:

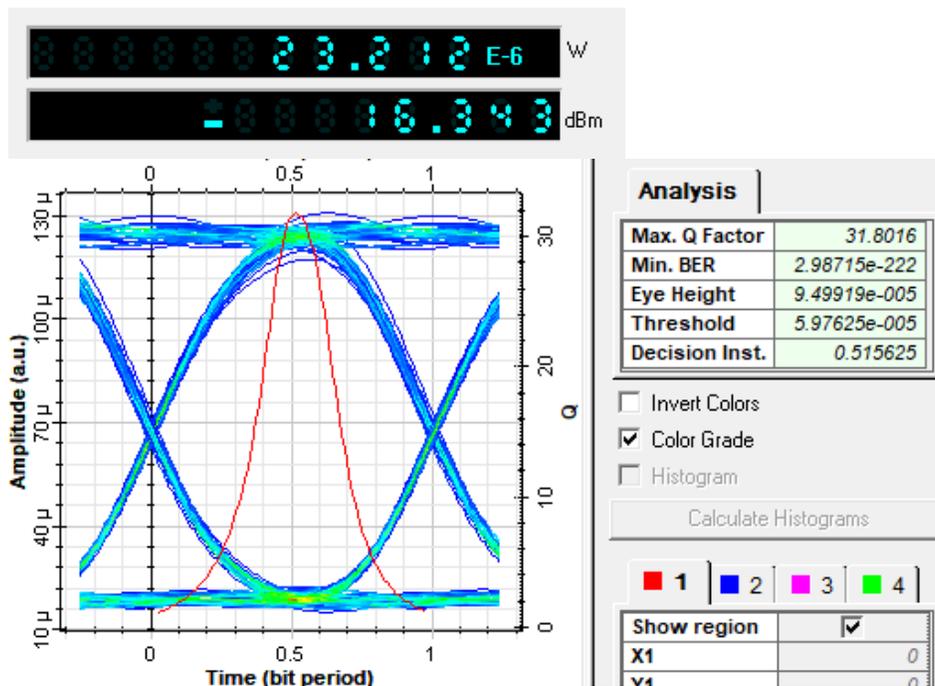


Fig. 110. Potencia recibida y diagrama de ojo para una división de 1:128 (187.8 THz)

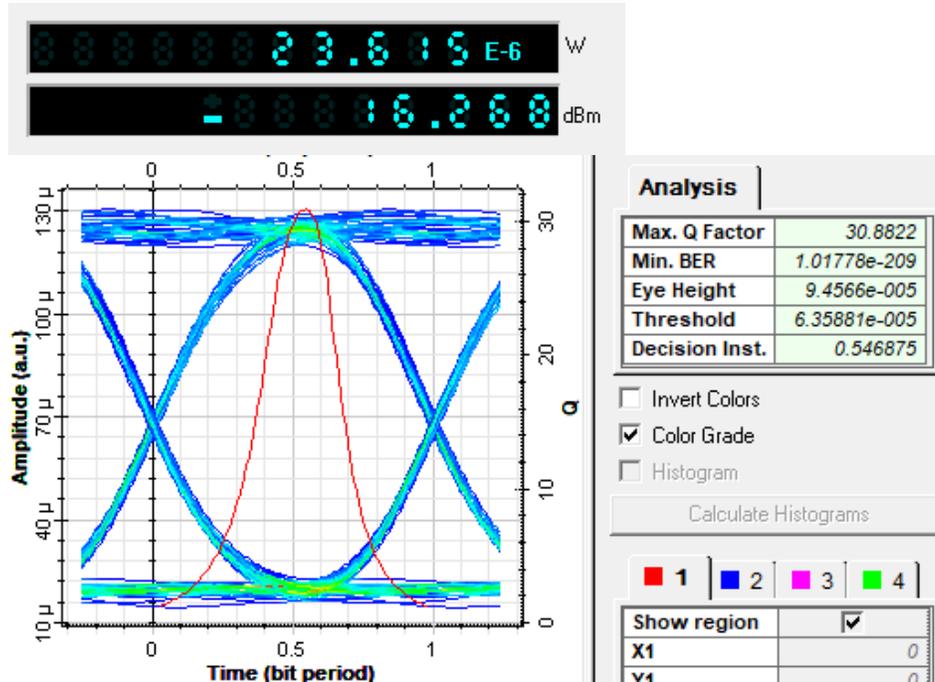


Fig. 111. Potencia recibida y diagrama de ojo para una división de 1:128 (187.7 THz)

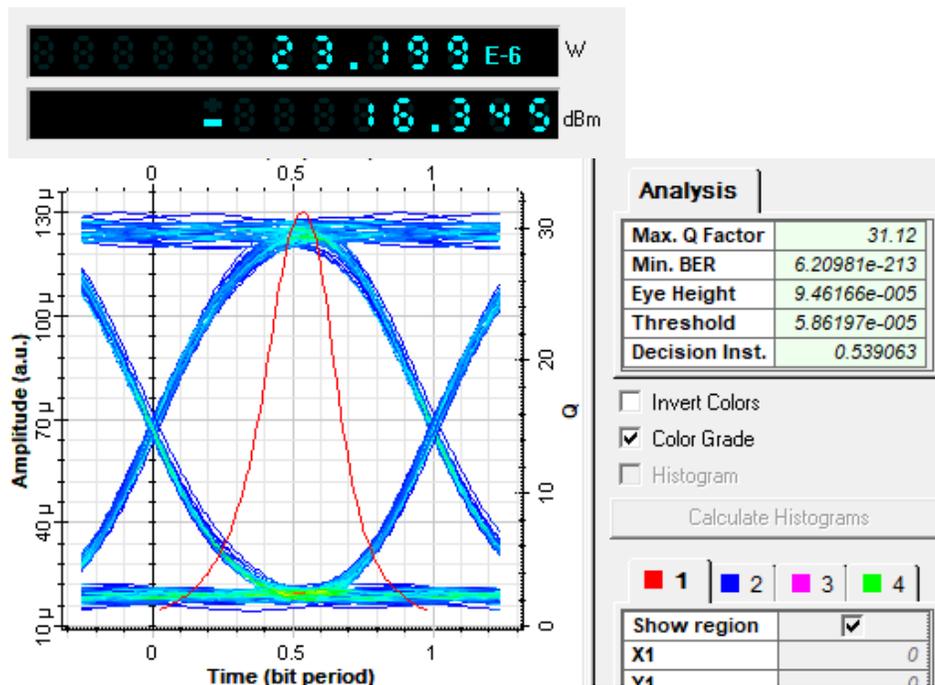


Fig. 112. Potencia recibida y diagrama de ojo para una división de 1:128 (187.6 THz)

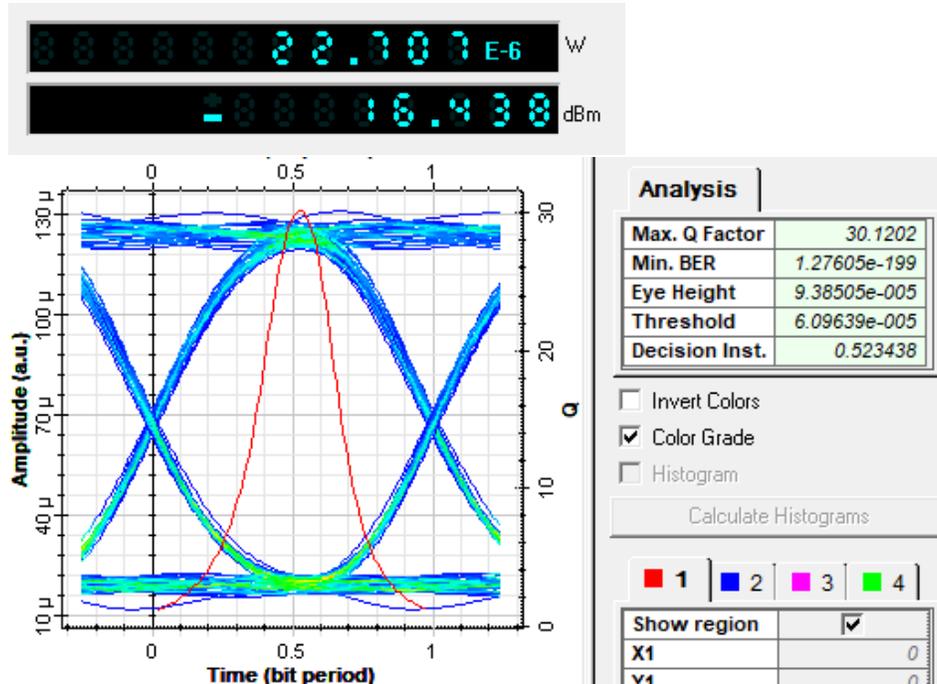


Fig. 113. Potencia recibida y diagrama de ojo para una división de 1:128 (187.5 THz)

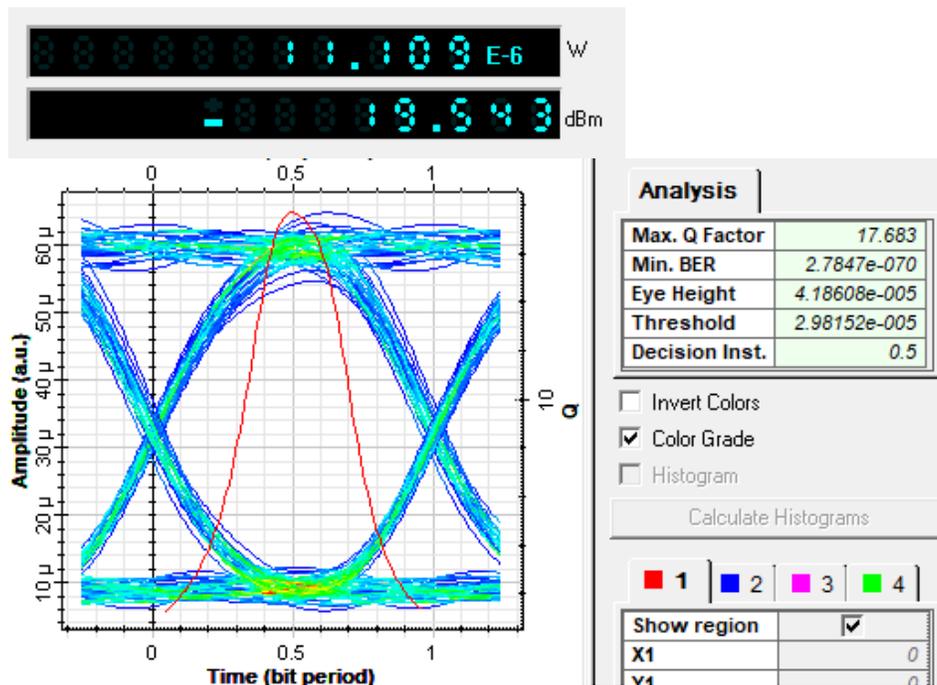


Fig. 114. Potencia recibida y diagrama de ojo para una división de 1:256 (187.8 THz)

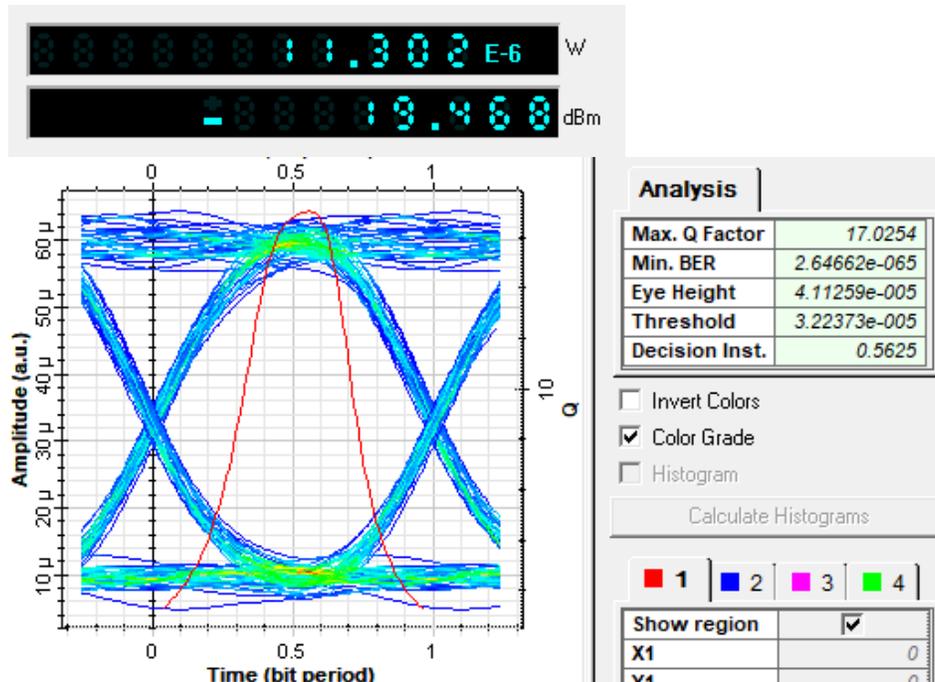


Fig. 115. Potencia recibida y diagrama de ojo para una división de 1:256 (187.7 THz)

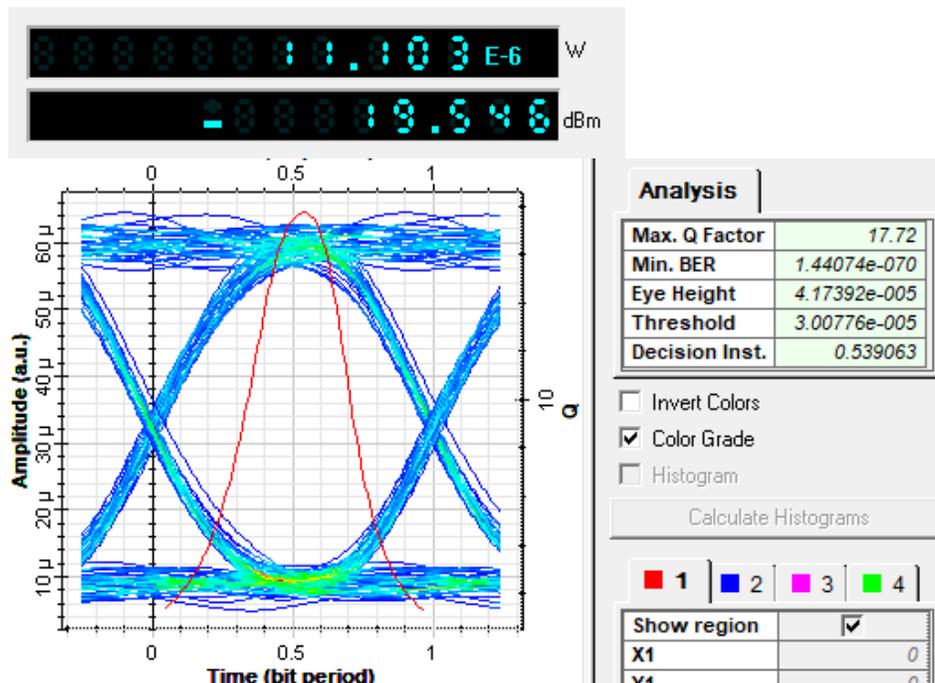


Fig. 116. Potencia recibida y diagrama de ojo para una división de 1:256 (187.6 THz)

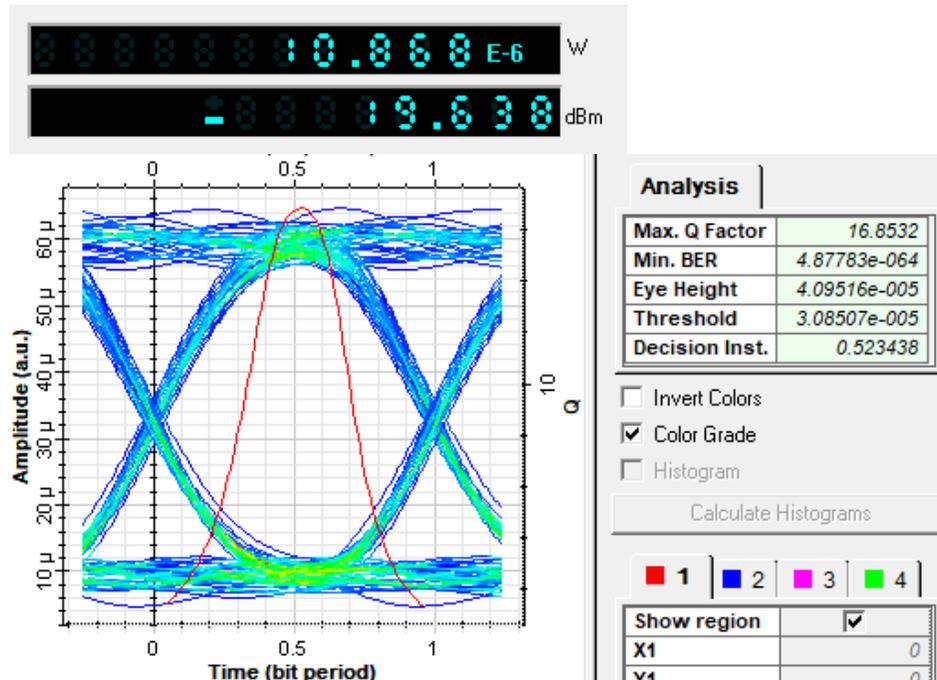


Fig. 117. Potencia recibida y diagrama de ojo para una división de 1:256 (187.5 THz)

En la Tabla 37, se puede ver la comparativa de las potencias de recepción, el Factor Q y BER, al haber incrementado la relación de división en cada tecnología, incluyendo los resultados obtenidos en el apartado 5.1:

Tabla 37. Resultados del rendimiento para las diferentes divisiones

Relación de división	Parámetro	GPON clase B+	XGS-PON clase N2	NG-PON2 clase N2			
				(187.8 THz)	(187.7 THz)	(187.6 THz)	(187.5 THz)
1:64	Prx	-16.809	-14.714	-12.932	-12.858	-12.935	-13.028
	Factor Q	26.9311	44.4681	54.4891	52.3475	51.055	50.4466
	BER	4.74E-160	0	0	0	0	0
1:128	Prx	-20.220	-18.125	-16.343	-16.268	-16.345	-16.438
	Factor Q	12.5042	24.7785	31.8016	30.8822	31.12	30.1202
	BER	3.54E-36	7.644E-136	3.075E-222	1.035E-209	6.459E-213	1.317E-199
1:256	Prx	-23.420	-21.325	-19.543	-19.468	-19.546	-19.638
	Factor Q	6.07493	13.3935	17.683	17.0252	17.72	16.8532
	BER	7.288E-10	6.809E-41	8.331E-71	1.213E-66	1.786E-70	1.939E-67

Graficando los resultados de la Tabla 37 mediante gráficos de barra, se tiene lo siguiente:

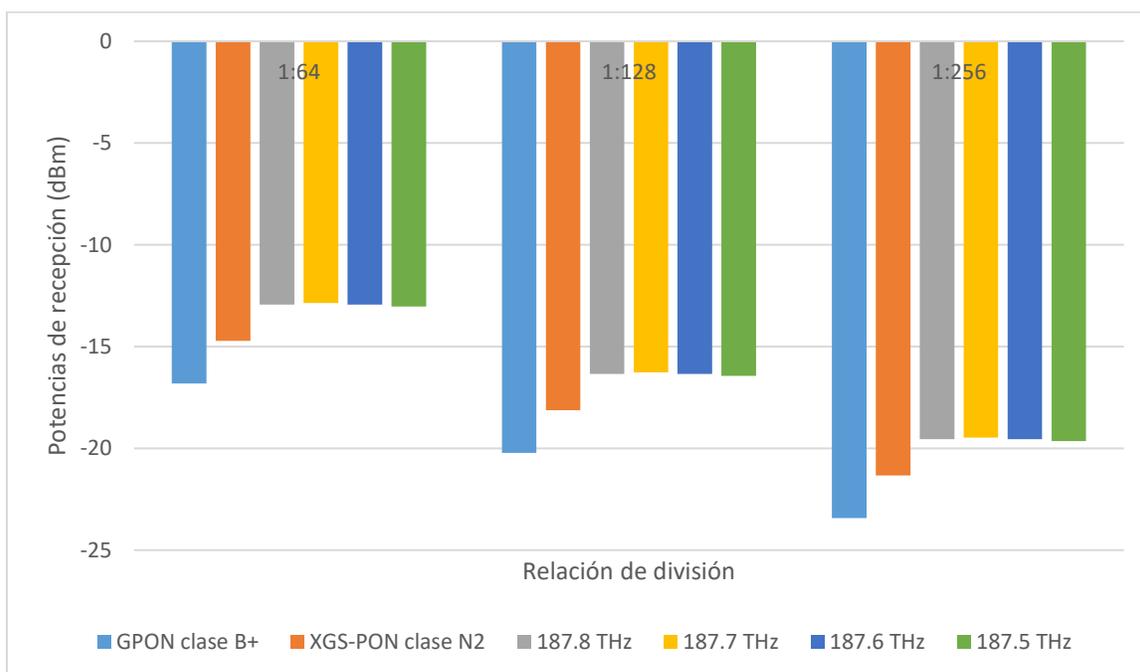


Fig. 118. Potencias de recepción para las diferentes divisiones

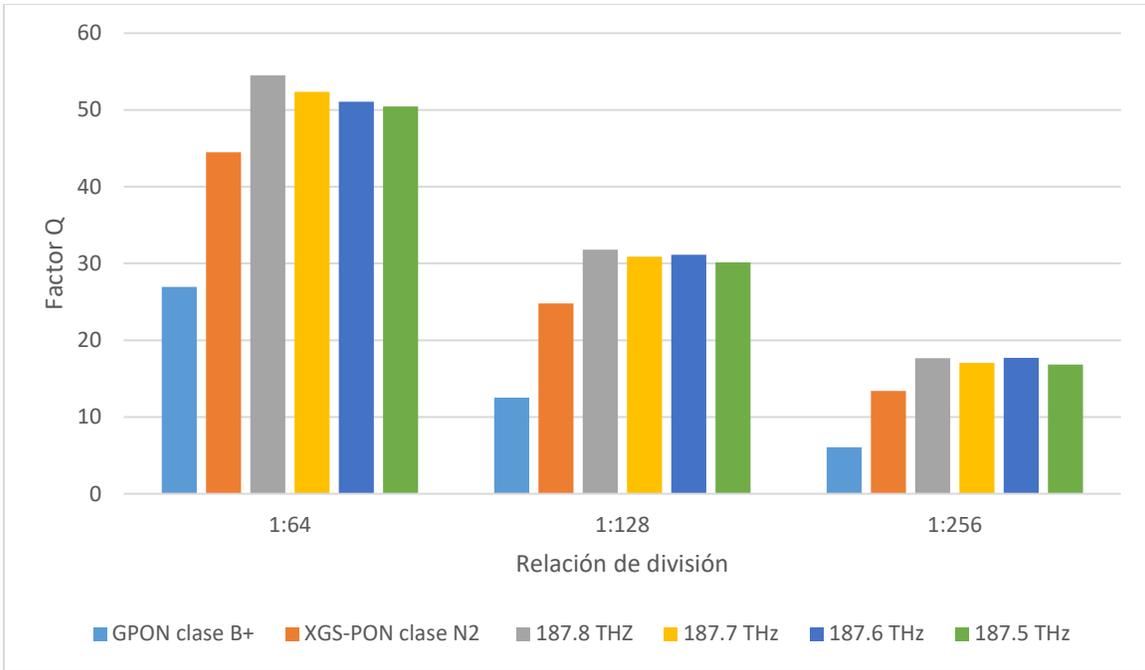


Fig. 119. Factor Q para las diferentes divisiones

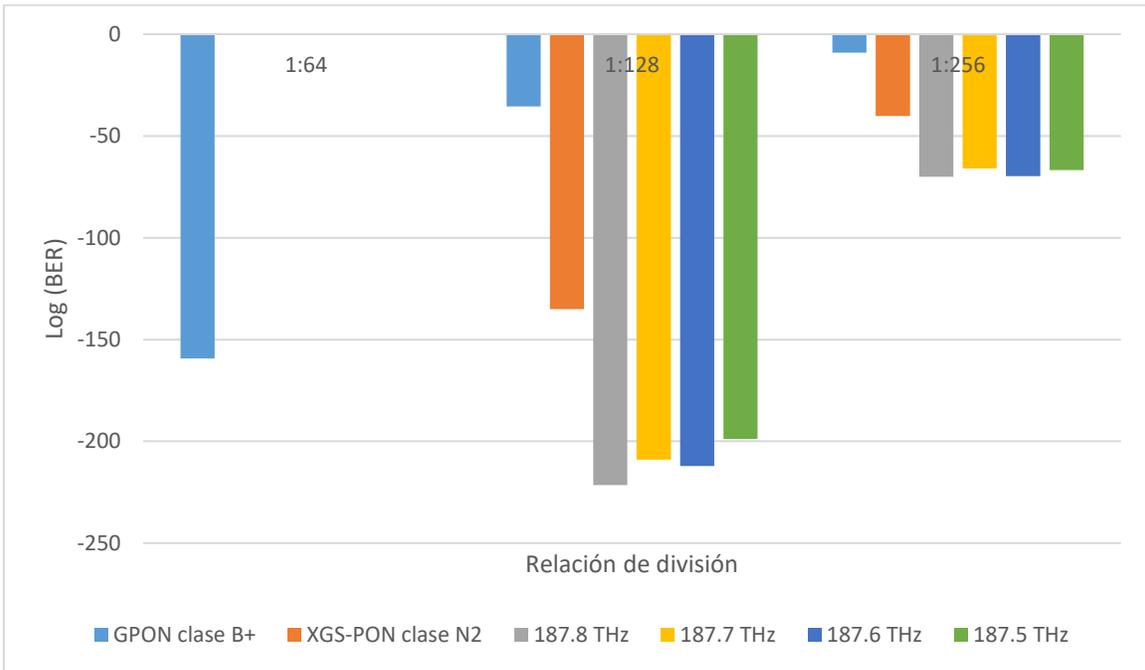


Fig. 120. Log (BER) para las diferentes divisiones

De acuerdo con la Fig. 118, para las potencias de recepción se tiene que:

- En GPON a medida que se incrementa la relación de división de 1:64 a 1:256, la potencia recibida disminuye de **-16.809 dBm** a **-23.420 dBm**.
- En XGS-PON la potencia recibida es más alta que en GPON clase B+, variando de **-14.714 dBm** a **-21.325 dBm** al aumentar la relación de división, de 1:64 a 1:256.
- En NG-PON2 la potencia recibida es superior a las tecnologías anteriores, comenzando alrededor de **-12.932 dBm** y decreciendo hasta **-19.638 dBm** en la relación 1:256.

De acuerdo con la Fig. 119, para el Factor Q se tiene que:

- En GPON el Factor Q disminuye significativamente con el aumento de la relación de división, pasando de **26.9311** a **6.07493**. Esto indica una degradación notable en la calidad de la señal.
- En XGS-PON el Factor Q también disminuye, pero se mantiene más elevado que en GPON, variando de **44.4681** a **13.3935**.
- El Factor Q es superior comparado con las otras tecnologías, comenzando en valores como **54.4891** y reduciéndose hasta **16.8532**. Este alto valor refleja una mejor calidad de señal y menor tasa de error en bits (BER), y por consiguiente mayor escalabilidad.

De acuerdo con la Fig. 120, para la BER se tiene que:

- En GPON a medida que la relación de división aumenta, el BER también incrementa, pasando de **4.74E-160** en 1:64 a **7.288E-10** en 1:256.
- En XGS-PON la BER se mantiene extremadamente baja hasta en divisiones mayores, con valores como **6.809E-41** en 1:256.
- NG-PON2 presenta una BER extremadamente baja, incluso para altas relaciones de división, manteniéndose en valores como **1.939E-67** en 1:256.

En la Tabla 38 se puede observar la diferencia entre el Factor Q, así como **la mejora porcentual del Factor Q de XGS-PON y NG-PON2 con respecto a GPON**, para las diferentes relaciones de división.

Tabla 38. Diferencia entre Prx, Factor Q y mejora porcentual con respecto a GPON en las diferentes relaciones

Relación de división	Parámetro	XGS-PON/GPON	NG-PON2/GPON			
			(187.8 THz)	(187.7 THz)	(187.6 THz)	(187.5 THz)
1:64	Prx	2.095	3.877	3.951	3.874	3.781
	Factor Q	17.537	27.558	25.4164	24.1239	23.5155
	Mejora porcentual de Q (%)	65.1180%	102.3278%	94.3756%	89.5764%	87.3173%
1:128	Prx	2.095	3.877	3.951	3.874	3.781
	Factor Q	12.2743	19.2974	18.3778	18.6158	17.616
	Mejora porcentual de Q (%)	98.1614%	154.3273%	146.9730%	148.8764%	140.8806%
1:256	Prx	2.095	3.877	3.951	3.874	3.781
	Factor Q	7.31857	11.60807	10.95027	11.64507	10.77827
	Mejora porcentual de Q (%)	120.4717%	191.0815%	180.2534%	191.6906%	177.4221%

Graficando estos resultados se tiene lo siguiente:

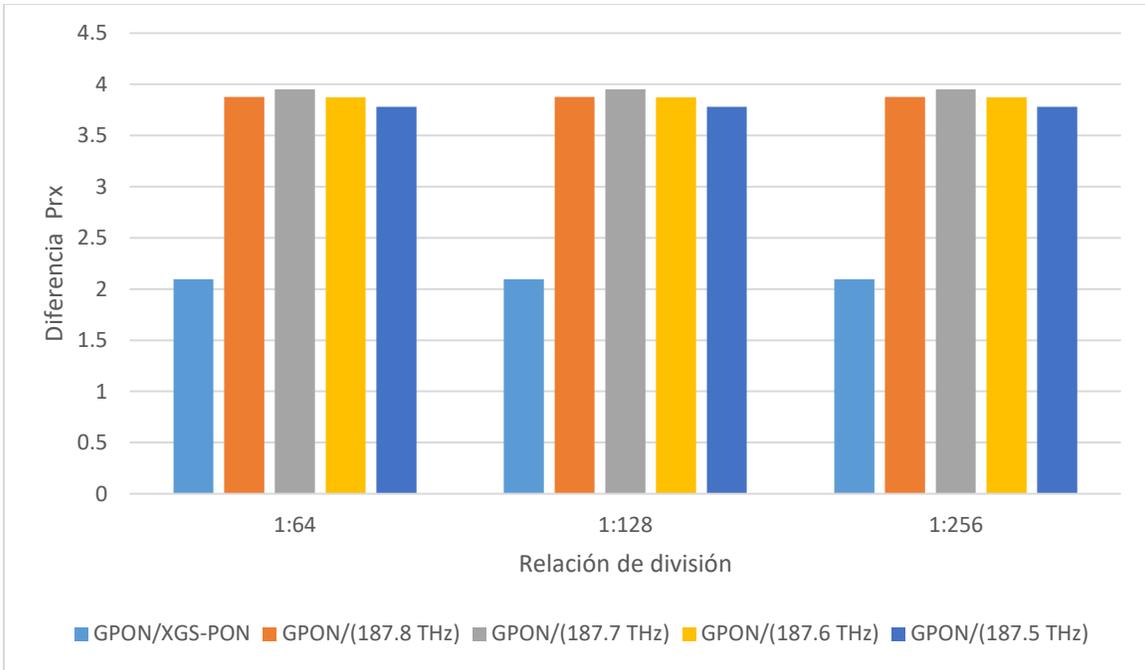


Fig. 121. Diferencia de potencias de recepción para las diferentes divisiones

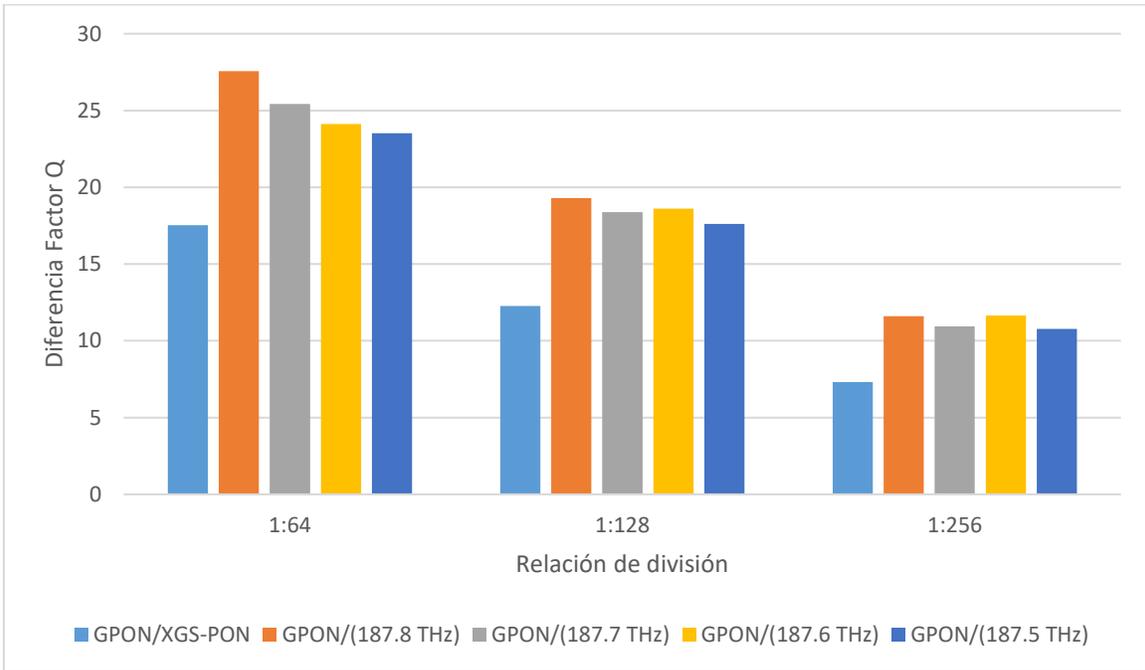


Fig. 122. Diferencia del Factor Q con respecto a GPON para las diferentes divisiones

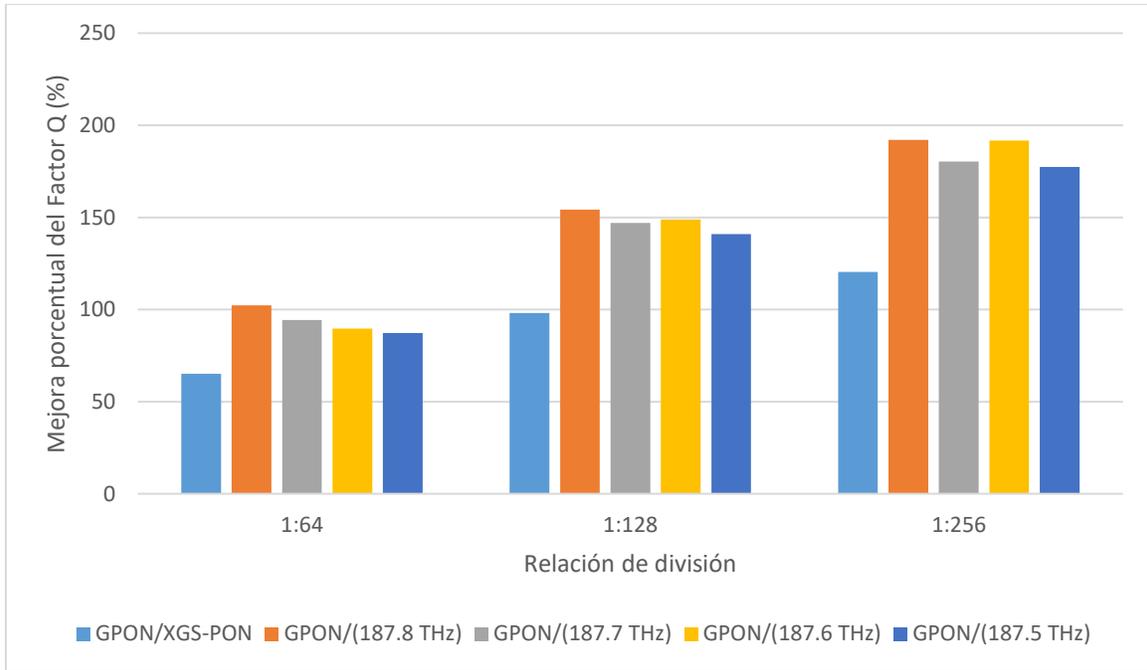


Fig. 123. Mejora porcentual del Factor Q con respecto a GPON para las diferentes divisiones

De acuerdo con la Tabla 38 y las gráficas, se puede observar las diferencias de las tecnologías PON de nueva generación con respecto a GPON:

- XGS-PON tiene una Prx mayor en **2.095 dB**. Un Factor Q mayor en 17.537 con una mejora porcentual de **65.118 %** del Factor Q para una relación de división de 1:64; Un Factor Q mayor en 12.2743 con una mejora porcentual del Factor Q de **98.161 %** para 1:128; y un Factor Q mayor en 7.31857 con una mejora porcentual del Factor Q de **120.471 %** para 1:256.
- NG-PON2 (187.8 THz) tiene una Prx mayor en **3.877 dB**. Un Factor Q mayor en 27.558 con una mejora porcentual de **102.327 %** para una relación de división de 1:64; un Factor Q mayor en 19.2974, con una mejora porcentual de **154.327 %** para 1:128; y un Factor Q mayor en 11.60807 con una mejora porcentual **191.081 %** para 1:256.
- NG-PON2 (187.7 THz) tiene una Prx mayor en **3.951 dB**. Un Factor Q mayor en 25.4164 con una mejora porcentual de **94.375 %** para una relación de división de 1:64, un Factor Q mayor en 18.3778, con una mejora porcentual de **146.973 %** para 1:128; y un Factor Q mayor en 10.95027 con una mejora porcentual de **180.253 %** para 1:256.

- NG-PON2 (187.6 THz) tiene una Prx mayor en **3.874 dB**. Un Factor Q mayor en 24.1239, con una mejora porcentual de **89.576 %** para una relación de división de 1:64; un Factor Q mayor en 18.6158 con una mejora porcentual de **148.876 %** para 1:128; y un Factor Q mayor en 11.64507 con una mejora porcentual de **191.69 %** para 1:256.
- NG-PON2 (187.5 THz) tiene una Prx mayor en **3.781 dB**. Un Factor Q mayor en 23.5155 con una mejora porcentual de **87.317 %** para una relación de división de 1:64; un Factor Q mayor en 17.616 con una mejora porcentual **140.88 %** para 1:128; y un Factor Q mayor en 10.77827 con una mejora porcentual de **177.422 %** para 1:256.

Con los resultados del análisis comparativo, se comprobó que las PON de nueva generación, pueden transmitir mayor tasa de datos, para una mayor cantidad de usuarios, con XGS-PON clase N2 a una tasa de transmisión de descarga de 10 Gbps con un mejor rendimiento, capacidad y escalabilidad en comparación a GPON para divisiones de 1:64 y 1:128 por puerto, pero con menor rendimiento y escalabilidad que NG-PON2, debido a su menor potencia de transmisión y por consiguiente, menor presupuesto de potencia. Y finalmente NG-PON2 clase N2, con 10 Gbps por canal y 40 Gbps en total, con un rendimiento, capacidad y escalabilidad mayor que GPON y XGS-PON, en sus cuatro canales recepción, lo que permite realizar divisiones de 1:128 y 1:256 por puerto, debido a su mayor potencia de transmisión y por consiguiente mejor presupuesto de potencia.

De lo anterior, en la simulación y análisis de NG-PON2, se presentaron algunas dificultades en cuanto a la implementación en el software, por lo que se obtuvieron resultados que aparentemente, no son tan esperados en los parámetros de rendimiento. Esto se pudo haber generado debido a que, al ser una tecnología multicanal, se ve afectada por el acople de elementos de multiplexación y filtros, así como las limitaciones en las herramientas del software y su capacidad de procesamiento, que nos permitieran implementar una red de esta especificación por su complejidad, ya que no se utilizó una versión más actualizada; y otra razón a considerar, es que la configuración realizada de los parámetros de recepción, como el filtrado, la capacidad de respuesta y la ganancia en los cuatro canales, se hizo de la misma manera en las características y parámetros de la ONU XGS-PON, tomando como referencia las investigaciones y hoja de datos mencionadas del apartado 4.2.3, por lo que para una correcta implementación y simulación de esta

tecnología, hizo falta mayor información, referencias y hojas de datos para una correcta configuración.

Aun así, los resultados obtenidos son muy aceptables, debido a que NG-PON2 clase N2, tiene una mayor potencia de transmisión, lo que implica una potencia de recepción mayor y un mejor rendimiento en sus cuatro canales de transmisión, en comparación a GPON clase B+ y XGS-PON clase N2, pero mayor complejidad en su implementación.

En la Tabla 39, se muestra un resumen comparativo de lo realizado:

Tabla 39. Resumen comparativo de las tres tecnologías

Parámetro	GPON clase B+	XGS- PON clase N2	NG-PON2 clase N2				
			(187.8 THz)	(187.7 THz)	(187.6 THz)	(187.5 THz)	
Transmisor (OLT)							
Tipo de láser	CW (onda continua)						
Ancho línea (MHz)	10						
Potencia Tx. (dBm)	4.888	6.888	8.888	8.888	8.837	8.785	
Long. de onda (nm)	1490	1577	1596.34	1597.19	1598.04	1598.89	
Tasa de Tx (Gbps)	2.5	10					
Tasa de extinc. (dB)	8.2						
Red de distribución óptica (ODN)							
Distancia (km)	$\cong 1.9$						
Atenuación (dB/km)	0.24	0.19					
Disp. (ps/nm/km)	14	18.5	19.5				
Pérdida total Splitter (dB)	20.76						
Pérdida total adicional (dB)	0.48						
Receptor (ONU)							
Filtro óptico	Filtro pasabanda de Bessel segundo orden						
BW de filtro (GHz)	10	30					
Fotodetector	APD						
Ganancia	1	3					
Responsividad (A/W)	0.95	1					
Resultados							
1:64 divisiones	Prx	-16.809	-14.714	-12.932	-12.858	-12.935	-13.028
	Factor Q	26.9311	44.4681	54.4891	52.3475	51.055	50.4466
	BER	4.74E-160	0	0	0	0	0
1:128 divisiones	Prx	-20.220	-18.125	-16.343	-16.268	-16.345	-16.438
	Factor Q	12.5042	24.7785	31.8016	30.8822	31.12	30.1202
	BER	3.54E-36	7.644E-136	3.075E-222	1.035E-209	6.459E-213	1.317E-199
1:256 divisiones	Prx	-23.420	-21.325	-19.543	-19.468	-19.546	-19.638
	Factor Q	6.07493	13.3935	17.683	17.0252	17.72	16.8532
	BER	7.288E-10	6.809E-41	8.331E-71	1.213E-66	1.786E-70	1.939E-67

5.4. Comparativo económico de equipos OLT y ONU

En la actualidad, existe una gran cantidad de empresas que se dedican a la fabricación de equipos transmisores y receptores PON, por lo que en este apartado se hizo una descripción comparativa entre los costos de algunas marcas disponibles en el mercado, de las tecnologías mencionadas. En la Tabla 40, se muestra diferentes equipos OLT y ONU de cada tecnología, con sus costos respectivos:

Tabla 40. Marcas y modelos de algunos equipos terminales PON

Dispositivo	Marca	Modelo	Costo c/u	Características
GPON				
ONU	Data	FD704GW	\$35	4 FE ports, 2 POTS ports, Wi-Fi dualband
	Huawei	EG8145V5	\$27	4 FE ports, 2 POTS ports, Wi-Fi
SFP	Furukawa	LR 1490NM	\$60 - \$80	2.488 up/1.244 down Gbps, clase B+
OLT	VSOL	V1600G1	\$1200 - \$1300	8 puertos y soporta hasta 512 ONU
	Huawei	MA5608T	\$1500 - \$3000	8-16 puertos y soporta hasta 1024 ONU
XGS-PON				
ONU	Orfa	OXG-99C	\$60	1 GE Lan Port, bridge mode
	Huawei	HN8546X6	\$100 - \$150	4 GE ports, 2 POTS ports, Wi-Fi 6
SFP	Nokia	3FE46232BA	\$300 - \$350	Tasas simétricas de 10 Gbps, clase N2
	Huawei	OM5270S	\$300 - \$400	Tasas simétricas de 10 Gbps, clase N2
OLT	VSOL	V3600G1	\$2500 - \$3000	8 puertos, compatible con XG-PON, división máxima de 1:256 por puerto
	Huawei	MA5800-X2	\$2500 - \$5000	16 puertos, compatible con GPON y XG-PON, división máxima de 1:256 por puerto
NG-PON2				
ONU	Hisense	LTW2601	\$300 - \$500	Altas tasas de datos, soporte para múltiples longitudes de onda
SFP	Hisense	LTF62XX	\$800 - \$1200	Altas tasas de datos, soporte para múltiples longitudes de onda y escalabilidad
OLT	Calix	Calix E9-2	\$10000 - \$50000	Soporte para múltiples longitudes de onda, tasas de hasta 40 Gbps, compatible con XGS-PON

Nota: Se describe los costos aproximados y características de equipos activos PON, con su marca y modelo respectivo.

[58], [59], [60], [61], [62], [63], [64]

De la tabla de costos, se hizo un comparativo económico:

Tabla 41. Comparativo económico

Tecnología	Inversión inicial	Costo por unidad	Escalabilidad futura
GPON	Es la tecnología más económica en costos de equipos OLT y ONU, lo que la hace factible para implementaciones residenciales y zonas que no requieren un alto ancho de banda.	En cuanto a las ONU, son muy económicas y rentables para implementaciones de gran escala.	Actualmente es suficiente para las necesidades de ancho de banda domiciliaria, pero puede requerir mejoras y actualizaciones a medida que incrementa la demanda.
XGS-PON	Es más costoso, pero proporciona un mayor ancho de banda, adecuado para usuarios empresariales y residenciales de alta demanda.	Dependiendo de la marca y las funcionalidades, su precio es relativamente moderado, lo suficiente para brindar un buen equilibrio entre costo y beneficio.	Proporcionarían un buen rendimiento y calidad de servicio para las necesidades de abonados empresariales actuales y futuros.
NG-PON2	Es el más costoso, debido a su complejidad de fabricación y sus altas capacidades, adecuado para usuarios que requieren un gran ancho de banda para necesidades futuras.	Son muy elevadas, debido a su complejidad, funcionalidades, características avanzadas y alto rendimiento.	Es la que ofrecería mayor escalabilidad, lo que lo haría adecuado para infraestructuras de red proyectadas a futuro.

En resumen, GPON es actualmente ideal para abonados residenciales y en términos de costos el más rentable, pero a medida que incrementa la demanda, su implementación puede ser limitante debido a su menor capacidad. XGS-PON es moderadamente más caro que GPON, pero considerablemente más barato que NG-PON2, con un buen equilibrio entre costo y beneficio, lo que lo hace factible para aplicaciones empresariales actuales y futuras. Y por último NG-PON2, debido a sus altos costos en equipos, actualmente no sería adecuado para una implementación.

De acuerdo con esta comparación, XGS-PON sería la tecnología que mejor se adapta para una implementación en el Centro Histórico de la Ciudad de Cusco, debido a la alta densidad de abonados empresariales que requieren un alto ancho de banda, ofreciendo una buena calidad de servicio y una solución escalable a futuro, con un buen equilibrio entre costos y beneficios; aprovechando el máximo de la ODN actual de la red. Sin embargo, sería necesario realizar un estudio de mercado de la zona en cuestión, para conocer las necesidades de los usuarios, la evaluación de la competencia, medición de la viabilidad de los equipos, entre otros; para así

mejorar la toma de decisiones y aumentar las probabilidades de éxito. Por lo que este tema queda fuera de discusión.

CAPÍTULO VI: COSTOS Y PRESUPUESTO

6.1. Costos y presupuesto de equipos y materiales utilizados en el trabajo de tesis

En las siguientes tablas se detalla los costos para la realización del trabajo de tesis:

Tabla 42. Costo de equipos y materiales

Nro	Descripción	Cantidad	Precio Unid	Total
Equipos y bienes duraderos				
1	Compra de Software de simulación para redes ópticas	1.00 Unid	S/. 2 000.00	S/. 2 000.00
2	Equipo de medición óptica (power meter)	1.00 Unid	S/. 800.00	S/. 800.00
3	Unidad de red óptica (ONU)	1.00 Unid	S/. 200.00	S/. 200.00
4	Ordenador de sobremesa con procesador core i7 y 16 GB de RAM	1.00 Unid	S/. 3 000.00	S/. 3 000.00
Materiales y otros				
5	Hojas de impresión y/o materiales de escritorio para el desarrollo de la investigación	----	S/. 400.00	S/. 400.00
6	Alquiler de equipos para mediciones ópticas	----	S/. 600.00	S/. 600.00
7	Costos en viajes a campo	----	S/. 500.00	S/. 500.00
8	Servicio de terceros	----	S/. 600.00	S/. 600.00
Total				S/. 8 100.00

Tabla 43. Rubro de inversión

Nro	Rubro de inversión	Total	Porcentaje
1	Equipos y bienes duraderos	S/. 6 000.00	74.074 %
2	Materiales y otros	S/. 2 100.00	25.926 %
Total		S/. 8 100.00	100.00%

CONCLUSIONES

- Se realizó el análisis comparativo del rendimiento de las tecnologías GPON, XGS-PON y NG-PON2 en una red FTTH en el Centro Histórico del Cusco, y se pudo observar una clara evolución en términos de capacidad y eficiencia para satisfacer las demandas crecientes de ancho de banda.
- Se hizo el estudio de las diferencias tecnológicas entre GPON, XGS-PON y NG-PON2. GPON ofrece tasas de 2.5 Gbps de bajada y 1.25 Gbps de subida, utilizando una única longitud de onda, adecuada para aplicaciones básicas pero limitada para demandas futuras; XGS-PON con 10 Gbps simétricos y una sola longitud de onda, ofrece mayor capacidad para aplicaciones avanzadas; y por otro lado, NG-PON2, la tecnología más avanzada, utiliza múltiples longitudes de onda (WDM) para alcanzar hasta 40 Gbps agregados, siendo la solución más flexible y preparada para satisfacer las demandas de ancho de banda a largo plazo.
- Se evaluó experimentalmente una red GPON clase B+ del Centro Histórico de Cusco, realizando mediciones de potencia, describiendo la fibra usada, las rutas y las pérdidas ópticas. La simulación consideró el usuario más lejano con una división de 1:64, obteniendo un Factor Q de 26.9311, lo que indica buen rendimiento. Sin embargo, con divisiones de 1:128 y 1:256, el Factor Q disminuyó a 12.4504 y 6.04898 respectivamente; por lo que, a pesar de que estos valores están por encima de lo recomendado (ITU-T O.201), el equipo GPON actualmente instalado, no es capaz de soportar esta cantidad de usuarios por puerto.
- Se simuló y analizó la red XGS-PON clase N2 para el usuario más lejano, obteniendo un Factor Q de 44.3239 con una división de 1:64 usuarios, superando significativamente a GPON en rendimiento debido a su mayor potencia de transmisión y recepción. Con divisiones de 1:128 y 1:256, el Factor Q fue de 24.6857 y 13.3396 respectivamente, demostrando mayor capacidad de ancho de banda y escalabilidad.
- Se simuló y analizó la red NG-PON2 clase N2 para el usuario más lejano, obteniendo un Factor Q superior en sus cuatro canales de 54.4891, 52.3475, 51.055 y 50.4466 con una división de 1:64 usuarios, superando a GPON y XGS-PON en rendimiento y capacidad; con divisiones de 1:128 se obtuvo 31.8016, 30.8822, 31.12 y 30.1202; y con divisiones de 1:256 se obtuvo 17.683, 17.0252, 17.72 y 16.8532 los factores Q también fueron superiores a GPON y XGS-PON, lo que se traduce en una mayor escalabilidad.

- De acuerdo con los datos obtenidos de las recomendaciones, fichas técnicas e investigaciones, tanto XGS-PON como NG-PON2, requieren de parámetros de transmisión y recepción superiores a GPON (debido a su influencia directa en el Factor Q y BER) para soportar altas tasas de transmisión, mayor cantidad de usuarios y mayor distancia de cobertura, sin comprometer el rendimiento, para así garantizar una interconexión óptima con los usuarios.
- XGS-PON es la tecnología que mejor se adaptaría para una implementación en la zona del Centro Histórico del Cusco, ya que los resultados muestran una mejor respuesta a la atenuación que GPON y NG-PON2 bajo las mismas condiciones de la ODN del usuario más lejano y por consiguiente de toda la red. También permitiría realizar divisiones de 1:128 por puerto (ya que la ODN actual permite realizar este cambio), manteniendo un buen rendimiento y asegurando escalabilidad para demandas futuras; así mismo, sería una opción económicamente viable, debido a la alta densidad de usuarios empresariales de la zona.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda la tecnología GPON para clientes residenciales y pequeñas empresas, ya que brinda suficiente ancho de banda para navegación web, streaming y aplicaciones básicas, sin embargo, se debe considerar una planificación de migración a XGS-PON a medida que aumente la demanda en el ancho de banda según la zona.
- Se recomienda implementar la tecnología XGS-PON en entornos empresariales que requieren mayor capacidad, ya que puede soportar aplicaciones que requieren altas tasas de transmisión de datos como videoconferencias en alta definición, servicios en la nube, videovigilancia en alta definición, entre otros, por lo que es una opción ideal para la zona de estudio.
- La tecnología NG-PON2, por su complejidad y costos elevados, no sería recomendable actualmente para la zona del Centro Histórico de la ciudad del Cusco, pero si fuese recomendable desarrollar un plan de migración gradual de GPON a XGS-PON y luego a NG-PON2, para así optimizar recursos a futuro.
- Se recomienda a la Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica la adquisición y actualización de *software* para sistemas ópticos, que permitan desarrollar estudios, proyectos e investigaciones a los profesionales, estudiantes e interesados en el área de telecomunicaciones; así mismo, la adquisición de equipos transmisores, receptores y de medición que evalúen el rendimiento, para realizar pruebas experimentales en entornos reales.

REFERENCIAS

- [1] Leo López Olivera, “Incremento en la demanda de ancho de banda en el mundo”. Consultado: el 19 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.linkedin.com/pulse/incremento-en-la-demanda-de-ancho-banda-el-mundo-lopez-olivera/?trackingId=B4XArqgRT%2B2I3VC1IVkd1g%3D%3D>
- [2] OSIPTEL, “Internet fijo con fibra óptica superó los 2 millones de conexiones a nivel nacional en 2023”, OSIPTEL. Consultado: el 19 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.osiptel.gob.pe/portal-del-usuario/noticias/osiptel-internet-fijo-con-fibra-optica-supero-los-2-millones-de-conexiones-a-nivel-nacional-en-2023/>
- [3] OSIPTEL, “Conexiones de fibra óptica en regiones crecieron 463.67 % en los últimos cinco años”. Consultado: el 20 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.osiptel.gob.pe/portal-del-usuario/noticias/osiptel-conexiones-de-fibra-optica-en-regiones-crecieron-463-67-en-los-ultimos-cinco-anos/#:~:text=De%20esta%20manera%2C%20las%20conexiones,204%20conexiones%20a%20nivel%20nacional.>
- [4] Ramón Jesús Millán Tejedor, “Que es NG-PON”, *Consultoría estratégica en tecnologías de la información y comunicaciones*, 2013, Consultado: el 20 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.ramonmillan.com/tutoriales/nextgenerationpon.php>
- [5] I. G. Hurtado Panéz, “Desarrollo de una red FTTH con Tecnología GPON para el Acceso de telecomunicaciones en Hogares de la Ciudad de Yanahuanca, Provincia Daniel Alcides Carrión, Departamento Pasco”, Universidad Tecnológica del Perú, Lima, 2022.
- [6] R. A. López Alban, “Estudio, diseño y simulación de una red NG-PON2 para analizar su rendimiento en el barrio Juan de Velasco”, Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba, 2023.
- [7] I. S. T. P. Dian Hutami Stefani, “ANALISIS PERBANDINGAN TEKNOLOGI GPON DAN XGS-PON PADA PERANCANGAN JARINGAN AKSES FIBER TO THE HOME PERUMAHAN HARMONY RESIDENCE JANGLI”, *TRANSIENT*, sep. 2019, Consultado: el 9 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/transient>

- [8] N. A. N. A. A. K. K. Z. A. M. D. T. K.A. Mat Sharif, “Demonstration of XGS-PON and GPON Co-Existing in the Same Passive Optical Network”, *2018 IEEE 7th International Conference on Photonics (ICP)*, 2018.
- [9] M. I. Anis, M. S. Qureshi, y S. Zafar, “Demonstration of TWDM-PON Backward Compatibility with Conventional GPON”, *Wirel Pers Commun*, vol. 95, núm. 2, pp. 581–592, jul. 2017, doi: 10.1007/s11277-016-3911-7.
- [10] I. Seoane Pujol, “CONTRIBUCIONES AL DISEÑO DE REDES ÓPTICAS DE NUEVA GENERACIÓN: PROTECCIÓN, CALIDAD DE SERVICIO Y EFICIENCIA ENERGÉTICA”, Universidad Carlos III de Madrid, Leganés, 2012.
- [11] A. García Juárez, “INTRODUCCIÓN A LA OPTOELECTRÓNICA (Dispersión en Fibras Ópticas)”.
- [12] G. P. Agrawal, *Fiber Optic Communication Systems*. Wiley-Interscience, 2002.
- [13] Serprotel, “Introducción a las Fibras Ópticas”. Consultado: el 27 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://es.slideshare.net/slideshow/introduccion-a-las-fibras-opticas/161942291#54>
- [14] T. Tanbun-Ek *et al.*, “DFB lasers integrated with Mach-Zehnder optical modulator and a power booster fabricated by selective area growth MOVPE technique”.
- [15] The Fiber Optics Association Inc., “Transmisores y Receptores (Transceptores) de Fibra Óptica”. Consultado: el 22 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.thefoa.org/tech/ref/appln/transceiver.html>
- [16] OSI Optoelectronics, “Fiber Optic Components For Communication Systems”.
- [17] Perkin Elmer, “Avalanche Photodiodes: A User’s Guide”. Consultado: el 27 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.chem.uci.edu/~unicorn/243/papers/AvalanchePD.pdf>
- [18] Fibermall, “CWDM y DWDM”. Consultado: el 28 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.fibermall.com/es/blog/things-about-cwdm-dwdm-oadm.htm>
- [19] J. E. Sani Domínguez, “DISEÑO, EVALUACIÓN DE UNA RED FTTH UTILIZANDO OPTISYSTEM Y ESTRATEGIA PARA LA OBTENCIÓN DE CONCESIÓN QUE PERMITA BRINDAR SERVICIOS TRIPLE PLAY”, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, 2022.

- [20] Ticnus Technology Magazine, “Topologías de Red”, 2023. Consultado: el 28 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://ticnus.com/recursos/topologias-de-red-que-son/>
- [21] Reachoptics, “PON Passive Optical Network”. Consultado: el 25 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.reachoptics.com/pon-passive-optical-network-n106.html>
- [22] Furukawa Electric, “Módulo SFP GPON LR 1490 nm SC-UPC”, *Furukawa Solutions*, dic. 2022, [En línea]. Disponible en: <https://www.furukawatam.com/es/catalogo-de-productos-detalles/modulo-sfp-gpon-lr-1490nm-scupc>
- [23] PROMAX, “Tipos de conectores de fibra óptica”. Consultado: el 28 de enero de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.promax.es/esp/noticias/578/tipos-de-conectores-de-fibra-optica-guia-sencilla/>
- [24] SUPERFIBER, “Patch Cord SC/APC - SC/UPC Simplex SM”. Consultado: el 19 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://superfiber.pe/producto/patch-cord-simplex-sm-sc-apc-sc-upc/>
- [25] Optictimes, “Especificaciones técnicas ODF”. Consultado: el 25 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.optictimes.la/catalogo/producto/odf-deslizable-48-puertos-con-acoplador-scpcnegro>
- [26] UnitekFiber, “Cable óptico de fibra ADSS”. Consultado: el 19 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://es.unitekfiber.com/products/adss-fiber-optical-cable-all-dielectric-self-supporting-cable-sm-g652d-144-cores-300m-span-double-jacket-pe/>
- [27] Real Optic, “Mufa Fibra optica Empalmes Domo & Distribución”. Consultado: el 9 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://store.realoptic.com/product/mufa-fibra-optica-empalmes-domo-distribucion/>
- [28] SilexFiber, “Splitter Óptico PLC planar SC-APC”, 2014. Consultado: el 19 de enero de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://silexfiber.com/producto/divisor-splitter-optico-plc-planar-sc-apc/>
- [29] SAT PCS, “Caja NAP Fibra Óptica SAT 8 Puertos”. Consultado: el 19 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://satpcs.com/caja-nap-sat-8-puertos.html>
- [30] AixTon, “Cable de bajada ftth de 1/2/4 núcleos G657A2”. Consultado: el 19 de enero de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.aixton-6g.com/cable-de-bajada-ftth-de-124-nucleos-g657a2-cable-de-bajada-de-fibra-optica-product/>

- [31] Cablematic, “Conector rápido SC/APC”. Consultado: el 24 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://cablematic.com/es/productos/collection/bematik/?category=2>
- [32] International Telecommunication Union, “ITU-T G.984.1 Gigabit-capable passive optical networks (GPON): General characteristics”, mar. 2008. Consultado: el 25 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.984.1-200803-I/es>
- [33] J. Mario, M. Manzanares, J. María, y F. Sánchez, “Estudio tecno-económico del despliegue del estándar NG-PON2 sobre infraestructura óptica heredada”, Barcelona, ene. 2018.
- [34] CISCO, “Tecnología GPON”, San Francisco, dic. 2023. Consultado: el 4 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.cisco.com/c/es_mx/support/docs/switches/catalyst-pon-series/216230-understand-gpon-technology.html
- [35] International Telecommunication Union, “ITU-T G.984.2 Gigabit-capable passive optical networks (GPON): Physical media dependent (PMD) layer specification”, ago. 2019. Consultado: el 25 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.984.2-201908-I/en>
- [36] International Telecommunication Union, “ITU-T G.9807.1 10-Gigabit-capable symmetric passive optical network (XGS-PON)”, jun. 2016. Consultado: el 26 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.9807.1-201606-S/en>
- [37] International Telecommunication Union, “ITU-T G.989.1 40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): General requirements Amendment 1”, ago. 2015. [En línea]. Disponible en: <http://handle.itu.int/11.1002/1000/11>
- [38] International Telecommunication Union, “ITU-T G.989.2 Corrigendum 1 40-Gigabit-capable passive optical networks 2 (NG PON2): Physical media dependent (PMD) layer specification Corrigendum 1”, ago. 2019. [En línea]. Disponible en: <http://handle.itu.int/11.1002/1000/>
- [39] J. A. Dinamarca Ossa, “Informe de Teoría de Comunicaciones Digitales: Análisis de Diagramas de Ojo”, Valparaíso, nov. 2002.
- [40] International Telecommunication Union, “ITU-T O.201 Equipo de prueba del factor Q para evaluar la calidad de transmisión de los canales ópticos”, jul. 2003. Consultado: el 6 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.itu.int/rec/T-REC-O.201/es>
- [41] T. Chakma, “Optical Signal to Noise Ratio (OSNR)”, Bremen, 2005.

- [42] M. Marciniak, Marek. Jaworski, y Institute of Electrical and Electronics Engineers., “Quality Metrics for Optical Signals: Eye Diagram, Q-Factor, OSNR, EVM and BER”, *IEEE*, pp. 1–4, 2012.
- [43] MikroTik, “Cloud Core Router MikroTik CCR2004-1G-12S+2XS”. Consultado: el 3 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: https://mikrotik.com/product/ccr2004_1g_12s_2xs#fndtn-gallery
- [44] MikroTik, “Cloud Core Router MikroTik CCR1036-12G-4S-EM”. Consultado: el 3 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: https://mikrotik.com/product/ccr2004_1g_12s_2xs#fndtn-gallery
- [45] Optictimes, “LT-RG8608 8616 GPON OLT datasheet v1.0”, Zhejiang, 2023. Consultado: el 25 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://optictimes.la/catalogo/producto/olt-gpon-de-8-puertos-pon>
- [46] Optictimes, “xPON ONT RX5104WT Product Overview”, 2023. Consultado: el 22 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://optictimesperu.com/>
- [47] DATA SAC, “xPON ONU DATA FD704GW datasheet v2.0”, 2023. Consultado: el 23 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.cdatic.com/products/fd714gw-r760-catv-onu.html>
- [48] HUAWEI, “ONT EchoLife EG8145V5 Datasheet”, Shenzhen, 2020. Consultado: el 19 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://e.huawei.com/es/products/optical-terminal/echolife-eg8145v5>
- [49] International Telecommunication Union, “ITU-T G.984.6 Gigabit-capable passive optical networks (GPON): Reach extension”, 2008. Consultado: el 7 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.984.6/es>
- [50] Cisco, “WDM Network Design”, San Francisco, feb. 2023. Consultado: el 24 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.ciscopress.com/articles/article.asp?p=30886&seqNum=5>
- [51] G. Keiser, *Optical Communication Essentials*. 2016.
- [52] Optiwave Design Software, “OptiSystem Overview”. Consultado: el 1 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://optiwave.com/optisystem-overview/>
- [53] GCS, “2.5Gbps APD Chip for GPON Application”, California.

- [54] FS Community, “XGSPON OLT SFP+ Optical Transceiver Module”, 2024. Consultado: el 27 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.fs.com/mx/products/141199.html?attribute=99229&id=3568677>
- [55] Lumentum, “10 Gbps Avalanche Photodiode (APD) Chip”, 2020. [En línea]. Disponible en: www.lumentum.com
- [56] FS Community, “XGSPON ONU SFP+ Transceiver”, 2024. Consultado: el 27 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.fs.com/mx/products/141199.html?attribute=101095&id=3569236>
- [57] M. Kessler, “Ajuste por mínimos cuadrados”, Cartagena, ene. 2010. Consultado: el 22 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: https://ocw.bib.upct.es/pluginfile.php/5235/mod_resource/content/1/ajuste_por_minimos_cuadrados.pdf
- [58] FLYTEC computers, “CDATA FD604GW-DX-R710 xPON ONU”. Consultado: el 3 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://flyteccomputers.com/c-data-technology-fd604gw-dx-r710>
- [59] VSOL, “OLT Products”. Consultado: el 3 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://es.vsolcn.com/products/olt>
- [60] HUAWEI, “HUAWEI Products”. Consultado: el 3 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://e.huawei.com/en/products/optical-access>
- [61] ORFA Tech, “The new generation of 10G PON”. Consultado: el 3 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://orfaoptic.com/10gpon-onu/#>
- [62] XPONSHOP, “High Capacity Access Node for Fiber Deployment”. Consultado: el 3 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.xponshop.com/>
- [63] Hisense Broadband, “Productos de comunicación óptica”. Consultado: el 3 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: https://hbmt.hisense.com/html/products/optical_communication/
- [64] Calix, “Sistema de acceso inteligente AXOS E9-2”. Consultado: el 4 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.calix.com/products/platform/intelligent-access/systems/axos-e9-2.html>

ANEXOS

Anexo A. Especificaciones técnicas de divisor de potencia óptico PLC SC-APC Silex Fiber



Divisor Splitter Optico PLC planar SC APC

silexfiber.com/producto/divisor-splitter-optico-plc-planar-sc-apc/



Divisor Splitter Optico PLC planar SC APC

Estos modelos con diseño compacto se caracterizan por alta fiabilidad, mínima pérdida de inserción, baja sensibilidad a la polarización (PDL) y gran uniformidad para optimizar la transmisión por fibra óptica.

Modelos con diseño compacto tipo PLC Planar y de tamaño reducido. PLC SPLITTER mini modulo.

Nuestros productos están diseñados para instalaciones de **telecomunicaciones, redes de área local, CATV, FTTx, FTTH (Fiber to the home)**

Configuraciones de acopladores divisores disponibles en: **1×2, 1×4, 1×6, 1×8, 1×16, 1×32, 1×64**, preconectorizados o libres para fusión.

Bajo pedido fabricaciones especiales en ramificaciones 1×3 y 1×6

[Limpiar](#)

SKU: SP03311 Categorías: [FTTH - ICT2](#), [PLC Planar Conectorizado](#), [Splitters](#) Etiquetas: [FTTH - ICT](#), [Materiales Pasivos](#), [PLC PLANAR](#), [Splitter FTTH](#), [Splitter SC](#), [Splitters](#) Divisores para instalaciones, Redes de comunicación y telecom, **(FTTx «FTTH», PON, Sistemas LAN, WAN)**

Divisor Splitter Optico PLC planar SC APC. El divisor óptico es un componente esencial utilizado en la arquitectura de redes FTTH PON, en las que una sola entrada óptica se divide en múltiples salidas.

Tipo	1×2	1×4	1×8	1×16	1×32	1×64
Longitud de onda (nm)	1260-1650					
Pérdida de inserción (dB) Máx. (P/S)	3.8/4.0	7.2/7.4	10,5/10,7	13.5/13,7	16,5/16,9	20.5/21
Uniformidad (dB) Máx. (P/S)	0,6	0,6	0,8	1,2	1,7	2,5
Pérdida de retorno (dB) Mín. (P/S)	50/55					
PDL Sensibilidad a polarización (dB) Máx (P/S)	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,4
Directividad (dB)	55					
Longitud de fibra (m)	1 (±0,1) Otras longitudes bajo demanda					
Tipo de fibra	G657A (Otras fibras bajo demanda)					
Pérdidas en función de longitud de onda (dB)	0,5	0,5	0,5	0,8	0,8	0,8
Sensibilidad a la temperatura (dB)	0,5	0,5	0,5	0,8	0,8	1
Temperatura de funcionamiento	-40 a +85 °C					
Temperatura de trabajo	-40 a +85 °C					
Dimensiones mm	4x4x40	4x7x50	4x7x50	4x7x50	4x7x60	4x7x60

Ventajas

- Tecnología planar
- Alta fiabilidad
- Bajas pérdidas de inserción
- Muy baja PDL (Sensibilidad a la polarización)
- Excelente uniformidad
- Diseño y medidas compactas

Anexo B. Especificaciones técnicas de fibras monomodo G.652.D y G.657.A

Fibra Monomodo G.652.D FUTONG:

1. General

- 1.1 The specification covers the construction and properties of optical fiber cable.
- 1.2 The cable shall be used for aerial or duct installed.
- 1.3 The optical fiber which is used in the cable is also in compliance with ITU-T Rec. G.652.D. Acquisition of ISO: 9001 and TISI 2166-2548 certificate.
- 1.4 The cable generally meets any latest relevant IEC Recommendation or better.
- 1.5 The single mode fiber shall operate in 1310nm and 1550nm.
- 1.6 The cable could serve for 25 years without any significant deterioration.

2. Cross Section of Cable

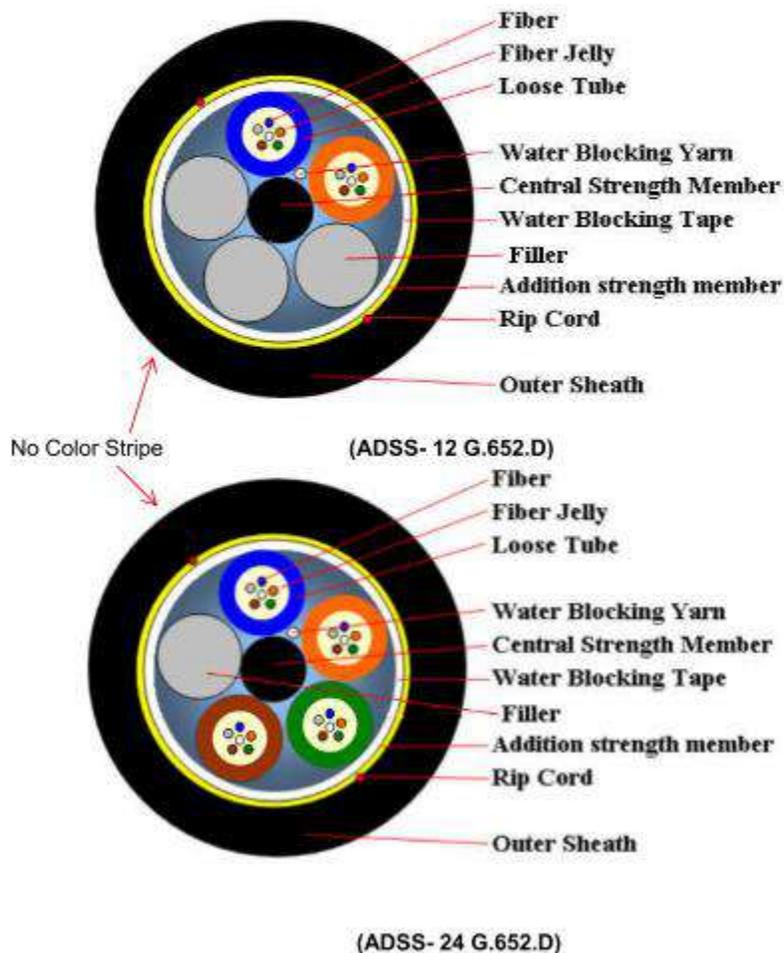


Figure 1 Cross Section of Cable



FUTONG

Product:ADSS
Spec.No.FT-S16275A
Issued:August 25, 2016

3. Optical Fiber in the Cable

3.1 Construction

Fiber	Type	Single mode type ITU-T G.652.D
	Material	Ge doped fused silica
Mode field diameter	1310 nm	9.2 ± 0.4 μm
Core / Cladding concentricity error		≤ 0.6 μm
Cladding diameter		125 ± 1 μm
Cladding non-circularity		≤ 1.0%
Coating	Material	UV curable acrylate
	diameter	245±5μm (uncolored) 250±15μm (Colored)
Fiber proof-tested		0.69 GPa (1.0%, 100kpsi) in accordance with the optical fiber proof test by EIA-455-31B or IEC 60793-1-30

3.2 Optical characteristics

Attenuation	@1310 nm	≤ 0.35 dB/km
	@1383nm	≤ 0.35 dB/km
	@1490nm	≤ 0.24 dB/km
	@1550 nm	≤ 0.21 dB/km
	@1625nm	≤ 0.23 dB/km
Chromatic dispersion coefficient	@1310 nm	≤ 3.5 ps/(nm·km)
	@1550 nm	≤ 18.0 ps/(nm·km)
	@1625 nm	≤ 22.0 ps/(nm·km)
Zero-dispersion Wavelength		1300~1324 nm
Zero-dispersion slope		≤ 0.092ps/(nm ² /km)
Cable Cut-off Wavelength (λ _{cc})		≤ 1260nm in accordance with EIA/TIA-455-170
Polarization Mode Dispersion(PMD)& PMDQ		≤ 0.2 ps/√km
Macrobend Attenuation (100turns. Radius:30mm)	@1550 nm	≤ 0.10 dB

Fibra Monomodo G.657.A Silex Fiber:



Cable Fibra Optica Monomodo SM G657A

silexfiber.com/producto/cable-fibra-optica-monomodo-sm-g657a2/



Cable Fibra Óptica SM G657A2 Monomodo

Cable Fibra Optica Monomodo SM G657A

Estas fibras están optimizadas para su uso en la longitud de onda de 1310 nm. Adecuadas en aplicaciones de redes metropolitanas, de acceso, cableados estructurados, CATV y sobre todo para instalaciones FTTx.

La fibra óptica monomodo (G657) diseñada para ofrecer grandes y pequeñas curvaturas sin apariencia de atenuación, proporciona una gran resistencia a las pérdidas adicionales debidas a macrocurvaturas.

Ideal para el montaje de cable en el interior de edificios, cables patchcords y/o cables de interconexión. Perfecta para aplicaciones en redes planta interna y externa en despliegues FFTH "Fibre-to-the-Home".

Estas fibras cumplen con IEC 60793-2-50, UIT G.652D, G.657A&B, Telcordia GR-20-CORE, ANSI/IECA S-87-640.

SKU: CF10783 Categorías: [Cables Fibra Optica](#), [Cables Internas tipos](#) Etiquetas: [SM G657A](#), [Tipos de Fibra](#)

Estas fibras están optimizadas para su uso en la longitud de onda de 1310 nm. Adecuadas en aplicaciones de redes metropolitanas, de acceso, cableados estructurados, CATV y sobre todo para instalaciones FTTx.

La fibra óptica monomodo (G657) diseñada para ofrecer grandes y pequeñas curvaturas sin apariencia de atenuación, proporciona una gran resistencia a las pérdidas adicionales debidas a macrocurvaturas.

Ideal para el montaje de cable en el interior de edificios, cables patchcords y/o cables de interconexión. Perfecta para aplicaciones en redes planta interna y externa en despliegues FFTH "Fibre-to-the-Home".

Estas fibras cumplen con IEC 60793-2-50, UIT G.652D, G.657A&B, Telcordia GR-20-CORE, ANSI/IECA S-87-640.



Ventajas y beneficios

- Baja atenuación
- Filtros y mayor cantidad de canales. Baja sensibilidad al hidrógeno.
- Gran Flexibilidad
- Posibilidad de micocurvaturas
- Extiende el rendimiento a distancia del PMD, reduciendo la regeneración.
- Mayor confiabilidad, durabilidad y rendimiento de envejecimiento, menor costo de mantenimiento.
- Comodidad de uso y flexibilidad
- Fácil conectorización

Propiedades Ópticas

PROPIEDADES ÓPTICAS		G.657.A1	G.657.A2 / B2	G.657.B3
Atenuación con Curvatura* (1550 nm)	1 vuelta / Mandril 10mm	< 0.75	< 0.10	< 0.03

	10 vueltas / Mandril 15mm	< 0.25	< 0.03	
	1 vuelta / Mandril 7.5mm			< 0.08
	1 vuelta / Mandril 5mm			< 0.15
Diámetro Campo Modal (mm)	1310 nm	9.0 ± 0.4	8.5 – 9.3	8.8 ± 0.4
	1550 nm	10.1 ± 0.5	9.4 – 10.4	9.8 ± 0.5
Coeficiente Atenuación (dB/Km)	1310 nm	< 0.35	< 0.35	< 0.35
	1383 nm	< 0.35	< 0.35	< 0.35
	1460 nm	< 0.25	< 0.25	
	1550 nm	< 0.21	< 0.21	< 0.22
	1625 nm	< 0.23	< 0.23	< 0.24
Dispersión Cromática (ps/nm.Km)	1285 – 1330 nm	< 3		
	1550 nm	< 18		
	1625 nm	< 22		
Longitud Onda Cero Dispersión (nm)		1300 – 1322	1300 – 1324	1300 – 1324
Pendiente Dispersión Cero (ps / nm ² Km)		< 0.090	< 0.092	< 0.092
Longitud Onda Corte Cable (nm)		< 1260		
PMD (ps / (ps/√Km))	1550 nm	< 0.1		

Especificaciones Mecánicas

	G.657.A1	G.657.A2 / B2	G.657.B3
Diámetro Revestimiento	125 ± 0.7 mm		125 ± 0.4 mm
Concentricidad Núcleo / Revestimiento	≤ 0.5 mm		≤ 0.3 mm



- Open to any brand of ONT
- L3 OLT, support RIP v1/v2 and OSPF v2
- Power backup
- Easy to manage and friendly interface

1 Product overview

LTseries GPON OLT products are 1U height 19 inch rack mount products. The features of the OLT are small, convenient, flexible, easy to deploy, high performance. It is appropriate to be deployed in compact.

Product	User interface	Unlink interface
LT-RG8608	8PON Port	8*GE+6*GE(SFP)+2*10GE(SFP+)
LT-RG8616	16PON Port	8*GE+4*1GE(SFP)/10GE(SFP+)

2 functional characteristics

Satisfactory standard

- Meet ITU-T G984/G.988 standard
- Meet China's relevant GPON standards

LT OLT

- Support static route RIP v1/v2, OSPF v2

Easy to manage

- Friendly EMS/Web/Telnet/CLI management
- CLI command style similar to mainstream manufacturers
- Support APP management

Fully open platform

- Open to any brand of ONT

High performance cost

- 1U height compact design
- Adopt mainstream chip scheme



5 technical indicator

Item		LT-RG8608	LT-RG8616
Chassis	Rack	1U 19 inch standard box	
1G/10G Uplink Port	QTY	16	12
	Copper 10/100/1000M auto-negotiation	8	
	SFP 1GE	6	4
	SFP+ 10GE	2	
GPON Port	QTY	8	16
	Physical Interface	SFP Slot	
	Connector Type	Class B+/C+	
	Max splitting ratio	1:128	
Management Ports	1*10/100BASE-T out-band port, 1*CONSOLE port		
PON Port Specification(Class B+ module)	Transmission Distance	20KM	
	GPON port speed	Upstream 1.244G Downstream 2.488G	
	Wavelength	TX 1490nm, RX 1310nm	
	Connector	SC/UPC	
	Fiber Type	9/125µm SMF	
	TX Power	+1--+5dBm	
	Rx Sensitivity	-28dBm	
	Saturation Optical Power	-8dBm	
Dimension(L*W*H)		442*200*43.6mm	442*320*43.6mm
Weight		3.1kg	4.5kg
AC Power Supply		AC:90~264V, 47/63Hz	
DC Power Supply		DC:-48V	x
Double Power Module Hot Backup		√	√

Anexo D. Especificaciones técnicas de Módulo SFP GPON LR-1490NM clase B+ SC-UPC
Furukawa



MÓDULO SFP GPON LR 1490NM SC-UPC

Descripción Los módulos transceptores ópticos Furukawa SFP son componentes utilizados para conectar equipos GPON. Los SFP mencionados abajo se pueden ser aplicados a los puertos ópticos GPON en la plataforma OLT de Furukawa.
La elección del modelo SFP depende de algunos factores, como la aplicación y el rango óptico necesarios para la red.

Características Generales	Parámetro	Min	Típico	Max
	Tensión (Vcc)	3.135	3.3	3.465
	Corriente GPON Classe B+ (mA)	-	300	500
	Corriente GPON Classe C+ (mA)	-	-	500
	Corriente GPON Classe C++ (mA)	-	350	500
	Temperatura de Operación (°C)	0	25	70
	Temperatura de Almacenamiento (°C)	-40	-	85
	Humedad Relativa - Operación (%)	0	-	80
	Humedad Relativa - Almacenamiento (%)	0	-	95

MÓDULO SFP CLASE B+ 2.5GBPS LR 1490NM SC-UPC (20KM) - Código: 35510197

Conector SC-UPC // Monomodo

Transmisión	Parámetro	Mínimo	Típico	Máximo
	Tipo de Transmisión	1490 nm DFB Laser CW mode		
	Velocidad de señalización +/- 100 ppm (Mbps)	2488 Down / 1244 Up		
	Potencia media de emisión (dBm)	1.5	-	5
	Salida óptica con Tx OFF (dBm)	-	-	-39
	Longitud de onda óptica central (nm)	1480	1490	1500
	Modo de supresión lateral (dB/Hz)	30	-	-
	Razón de extinción (dB)	8.2	-	-

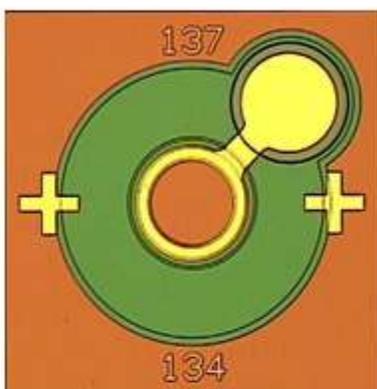
Recepción	Parámetro	Mínimo	Típico	Máximo
	Tipo de Recepción	1310nm APD/TIA Burst Mode		
	Longitud de onda (nm)	1260	1310	1360
	Sensibilidad de Recepción (dBm)	-	-	-28
	Sobrecarga óptica de Recepción (dBm)	-8	-	-
	Potencia óptica máxima de inserción (dBm)	-	-	2

2.5Gbps APD Chip for GPON Application

P/N: DO198_55um_APD



Known Good Die



Introduction

This high performance product is a 2.5G APD (avalanche photodiode) chip that features a large 55 μ m front-side illuminated detection window for easy optical assembly. This product has an excellent reliability, low dark current at operating voltage, and high sensitivity up to -34dBm with a low-noise TIA. It is designed primarily to be used at 1310nm and 1490nm APD-TIA GPON applications that enable data transmission for today's fiber-to-the-home (FTTH) market.

Key Features

- GCS proprietary design and process technologies
- 55 μ m optical detection window
- Backside common cathode and topside anode
- -34dBm typical sensitivity with low-noise TIA
- -40C to 85C operation range
- High reliability with GCS robust 4" wafer manufacturing with fast cycle-time
- Deliverable in GCS Known Good Die™ with 100% testing and inspection
- Customized layout dimensions available
- RoHS compliant

Applications

- 2.5Gbps GPON receiver
- SONET OC48
- Ethernet

SPECIFICATIONS (T=25C^o)

	Conditions	Min.	Typical	Max.	Unit	Notes
Responsivity	1550 nm, M=1	-	0.87	-	AW	
Gain	V _{br} -2V, P _o =1uW		9		-	
Breakdown voltage (V _{br})	I _d =10uA, P _o =1uW	40	47	50	V	
Temperature coefficient of V _{br}	-45°C~+80°C	0.06	0.08	0.11	V/°C	
Dark current	V _{br} -2V	-	1.3	20	nA	
Bandwidth	M=9, P _o =1uW, 25°C	2.5	-	3.2	GHz	
Capacitance	V _{br} -2V, f=1 MHz, 25°C	-	0.37	0.6	pF	
Wavelength range		1200	1490	1600	nm	
Recommended Operation Bias			V _{br} -2V			
Recommended Alignment Bias			V = V _{br} -5V			



MSOG22-xD6C-xxT1

Features

- ◆ Single Fiber GPON ONU Transceiver
 - 1310nm burst-mode 1.24416 Gb/s transmitter with DFB laser
 - 1490nm continuous-mode 2.488Gb/s APD receiver
- ◆ Compliant with ITU-T G.984.2 Class B+
- ◆ Compliant with ITU-T G.984.5
- ◆ Compliant with SFF-8472 v11.0
- ◆ Digital diagnostic monitoring (DDM) with internal calibration
- ◆ Small Form-Factor Hot Pluggable (SFP) Metallic Package with SC/UPC receptacle optical interface
- ◆ Burst On/Off time is less than 12.8ns
- ◆ +3.3V separated power supply
- ◆ LVPECL interface logic level for AC or DC coupled data input
- ◆ CML interface logic level for AC coupled data output
- ◆ LVTTTL for burst signal input
- ◆ LVTTTL for receiver loss of signal detect indication
- ◆ Compliant with RoHS 2.0
- ◆ Operating temperature range: 0°C~+70°C

Application

- ◆ Gigabit-Passive Optical Network (GPON) ONT
- ◆ FTTx

Description

The transmitter is designed for single mode fiber and operates at wavelength of 1310nm. The transmitter module uses a DFB laser diode and fully compliant with IEC60825 and CDRH class 1 eye safety. It contains APC functions, a temperature compensation circuit to ensure compliance with G.984.2 requirement at operating temperature, data inputs and AC or DC coupling circuit.

The receiver section uses a hermetic packaged APD-TIA (APD with trans-impedance amplifier) and a limiting amplifier. The APD converts optical power into electrical current and the current is transformed to voltage by the trans-impedance amplifier. The differential DATA and /DATA CML data signals are produced by the limiting amplifier. The APD-TIA is AC coupled to the limiting amplifier through a low pass filter.

Receiver Optical and Electrical Characteristics						
Parameter	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Unit	Notes
Data Rate	BR		2488.32		Mb/S	
Operating Wavelength	λ_C	1480	1490	1500	nm	
Receiver Sensitivity	P_{SEN}			-28	dBm	1
Overload Input Optical Power	P_{SAT}	-8			dBm	
Loss of Signal Assert Level	P_{LOSA}	-44			dBm	2
Loss of Signal Deassert Level	P_{LOSD}			-30	dBm	3
LOS Hysteresis	$P_{LOSD} - P_{LOSA}$	0.5		6	dBm	$\lambda = 1490\text{nm}$
Receiver Reflectance				-20	dB	$\lambda = 1490\text{nm}$
WDM Filter Isolation	ISO1	30			dB	1260~1450nm
	ISO2	30			dB	1539~1675nm
1310nm Tx to 1490nm Rx Crosstalk				-45	dB	
Data Output Differential Swing	V_{OUT}	300		1200	mV	4
RX_LOS Voltage		0		0.4	V	LVTTTL
		2.4		V_{CC}	V	
Signal-Detected Assert Time	T_{ASS}			100	us	
Signal-Detected Deassert Time	T_{DAS}			100	us	



10G Avalanche Photodiode (APD) Chip

PA006700



The Lumentum APD chip is an indium phosphide (InP) based device designed for high performance telecoms receiver applications up to 11.3 Gbps. The optical signal is received via top illumination of the central active region through a ring shaped contact which provides a 30 μm aperture.

A reverse electrical bias is applied across the active region by the P (anode) and N (cathode) contacts. The circular P bond pad has a diameter of 70 microns suitable for wirebonding.

The APD is suitable for operation at up to 11.3 Gbps at a multiplication gain factor between M3 and M10.

Performance is checked by on wafer testing comprising DC, CV and AC test measurements.

Proven reliability of <1FIT derived from over 40 billion field hours.

Telcordia ESD rating: minimum 500 V human body model.

Key Features

- 400 x 400 x 80 μm size
- Top illumination 30 μm aperture
- High bandwidth
- Excellent responsivity
- 0.2 pF capacitance
- Top side wirebond pads
- Optimized for epoxy attach
- -5 to +85°C operation

Benefits:

- Excellent performance to 11.3 Gbps
- Very high reliability
- Large volume production
- Robust ESD performance
- Full 6/6 RoHS compliance
- Fully Telcordia qualified

Applications:

- Long-haul networks
- Single-mode datacom and telecom
- 10G PON

Optical Characteristics

The following parametric limits detailed are for a case temperature range of 25 \pm 1°C

Parameter	Conditions	Symbol	Min	Typical	Max	Units
Breakdown voltage	In dark, at $I_d=10 \mu\text{A}$	V_{br}	-26	-28	-32	V
Dark current	In dark at $V_{br} \times 0.9$	I_{db}			50	nA
3dB Bandwidth at M=10 [1,2]	10 μW incident 1550 nm, $I=100 \mu\text{A}$	BW_{M10}	6.25	7		GHz
3dB Bandwidth at M=3 [1,2]	10 μW incident 1550 nm, $I=30 \mu\text{A}$	BW_{M3}	6.25	8.5		GHz
Responsivity [1]	10 μW , 1550 nm	R		1.0		A/W
Responsivity ratio at 1610 nm compared with 1550 nm	At fixed voltage (both at V_{M3} and V_{M10}), $P_{opt} = 10 \mu\text{W}$, $\lambda=1550 \text{ nm}$) ratio of currents when 1610 nm	R_{1610}/R_{1550}	0.75			
Responsivity ratio at 1300 nm compared with 1550 nm	At fixed voltage (both at V_{M3} and V_{M10}), $P_{opt} = 10 \mu\text{W}$, $\lambda=1550 \text{ nm}$) ratio of currents when 1300 nm	R_{1300}/R_{1550}	0.70			
Temperature coefficient of V_{br}	-40 to +85°C	dV_{br}/dT	0.040	0.050	0.061	Vdeg ⁻¹
Total capacitance	At $V_{br} \times 0.9$	C		0.22	0.25	pF
Optical overload	M3	Povld	-2			dBm

Note:

[1]: Gain M is DEFINED for assumed DC responsivity 1.0 A/W at 1550 nm. i.e. M = Current (A) / Optical power (W)

[2]: \pm 21 measurement made on wafer with GS probe and plane-ended SMF optical coupling at normal incidence into the optical aperture. 500 load.

Anexo H. Especificaciones técnicas de transceptor XGS-PON para OLT y ONU

Transceptor XGS-PON clase N2 para OLT FS:



Application

- XGSPON Access Network

Features

- Support ITU-T G.9807.1 XGS-PON OLT N2 Application
- Single fiber bi-directional data links with 9.953Gbps downstream and 9.953Gbps /2.488Gbps (compatible) upstream
- 1577nm continuous-mode transmitter with EML laser
- 1270nm burst-mode receiver with APD-TIA
- 2-wire interface for integrated digital diagnostic Monitoring
- SFP+ package with SC/UPC receptacle optical interface
- +3.3V power supplies
- RoHS With Exemptions
- 20Km Reach
- Operating case temperature Industry temp: -40~+85° C Commercial temp: 0~70° C

Parameter	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Unit	Note
Transmission Distance				20	km	
Rx Optical Isolation (From External Below 1260nm)	ISO	-32			dB	
Rx Optical Isolation (From External Above 1280nm)	ISO	-32			dB	

Notes:

1. Base on 3.14V

III. Optical Characteristics

Parameter	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Unit	Note
Transmitter (9.953G)						
Centre Wavelength	λ_C	1575	1577	1580	nm	
Side Mode Suppression Ratio	SMSR	30			dB	
Average Launch Power	POUT	4		7	dBm	1
Average Launch Power-OFF	POFF			-39	dBm	
Extinction Ratio	EX	8.2			dB	
Maximum Optical Path Penalty				1	dBm	2
Transmitter Eye Diagram		Comply with ITU-T G.9807.1				
Receiver (9.953G)						
Operating Wavelength	λ_C	1260	1270	1280	nm	
Sensitivity	PSEN			-28	dBm	3

Parameter	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Unit	Note
Saturation	PSAT	-7			dBm	3
Signal Detected De-assert Level	Psdd	-42			dBm	
Signal Detected Assert Level	Psda			-30	dBm	
Receiver (2.488G)						
Operating Wavelength	λ_c	1260	1270	1280	nm	
Sensitivity	PSEN			-29.5	dBm	
Saturation	PSAT	-9			dBm	
Signal Detected De-assert Level	Psdd	-42			dBm	
Signal Detected Assert Level	Psda			-30	dBm	

Notes:

1. The optical power is launched into 9/125um SMF.
2. 20KM transmission (DD20)
3. Measured with PRBS 2³¹-1 test pattern @9.953Gbps and ER=6dB BER =10⁻³
4. Measured with PRBS 2³¹-1 test pattern @2.488Gbps and ER=8.2dB, BER =10⁻⁴

Transceptor XGS-PON clase N2 para ONU:

XGS-PON ONU Optical Transceiver SFP+ Module



The XGS-PON ONU Transceiver is designed for 10G XGS-PON transmission. The module incorporates 10Gb/s 1270nm burst-mode transmitter and 10Gb/s 1577nm continuous-mode receiver. An integrated WDM coupler can separate 1577nm input light and 1270nm output light. The metallic package guarantees excellent EMI and EMC characteristics, which totally comply with international relevant standards.

Features

- Integrated Single fiber bi-directional optical subassembly
- Symmetric 9.953Gb/s upstream and downstream bit rate
- SFP+ metallic package, SC connector
- +3.3V single power supply
- Low power consumption
- 0 to 70°C operating case temperature
- Class 1 Laser eye safety
- Excellent EMI and EMC characteristics
- Compliant with RoHS&WFFF

Applications

- symmetric 10-Gigabit capable passive optical network (XGS-PON) system

Standards

- SFF 8432
- SFF 8472
- ITU-T G.9807.1

Ordering Information

Specifications

(tested under recommended operating conditions, unless otherwise noted)

Parameter	Symbol	Unit	Value		
			Min	typical	Max
Electrical Characteristics					
Power Consumption		W	-	-	2.0
LVPECL Single Ended Data Input Swing		mV	100	-	800
CML Single Ended Data Output Swing		mV	300		500
Differential Data input impedance		Ω	-	100	-
Signal Level(LVTTL)	V _{OH}	V	2.4	-	V _{cc}
	V _{OL}	V	0	-	0.8
Optical transmitter Characteristics					
Data Rate		Mbps	--	9953	-
Center Wavelength Range	λ_c	nm	1260	-	1280
Spectral Width(@-20dB)	$\Delta\lambda$	nm	-	-	1
Side Mode Suppression Ratio		dB	30		
Launch Optical Power	P _s	dBm	+4.0	-	+9.0
Off level light		dBm			-45
Burst turn on/off time	Ton/Toff	ns	-	-	51.2
Extinction Ratio 1	EX	dB	6	-	-
Eye Diagram	Compliant with ITU-T G.9807.1				
Optical receiver Characteristics					
Data Rate		Mbps	-	9953	-
Center Wavelength Range	λ_c	nm	1575	-	1580
Receiver Sensitivity 3	S	dBm	-	-	-28
Overload Input Optical Power	P _{in}	dBm	-8		
LOS	Optical Dessert	dB	-	-	-29
	Optical Assert		-44	-	-
LOS Hysteresis		dB	0.5	-	6
Note1. Measured with PRBS 2 ³¹ -1 test pattern @9.953Gbps.					
Note2. Transmit on 20km SMF.					
Note3. Measured with PRBS 2 ³¹ -1 test pattern @9.953Gbps with Tx on, ER=8.2dB, BER=10 ⁻³					

Anexo I. Características ópticas de transceptor SFP+ NG-PON2 para OLT



LTF62XX SFP+ NG-PON2 OLT Transceiver

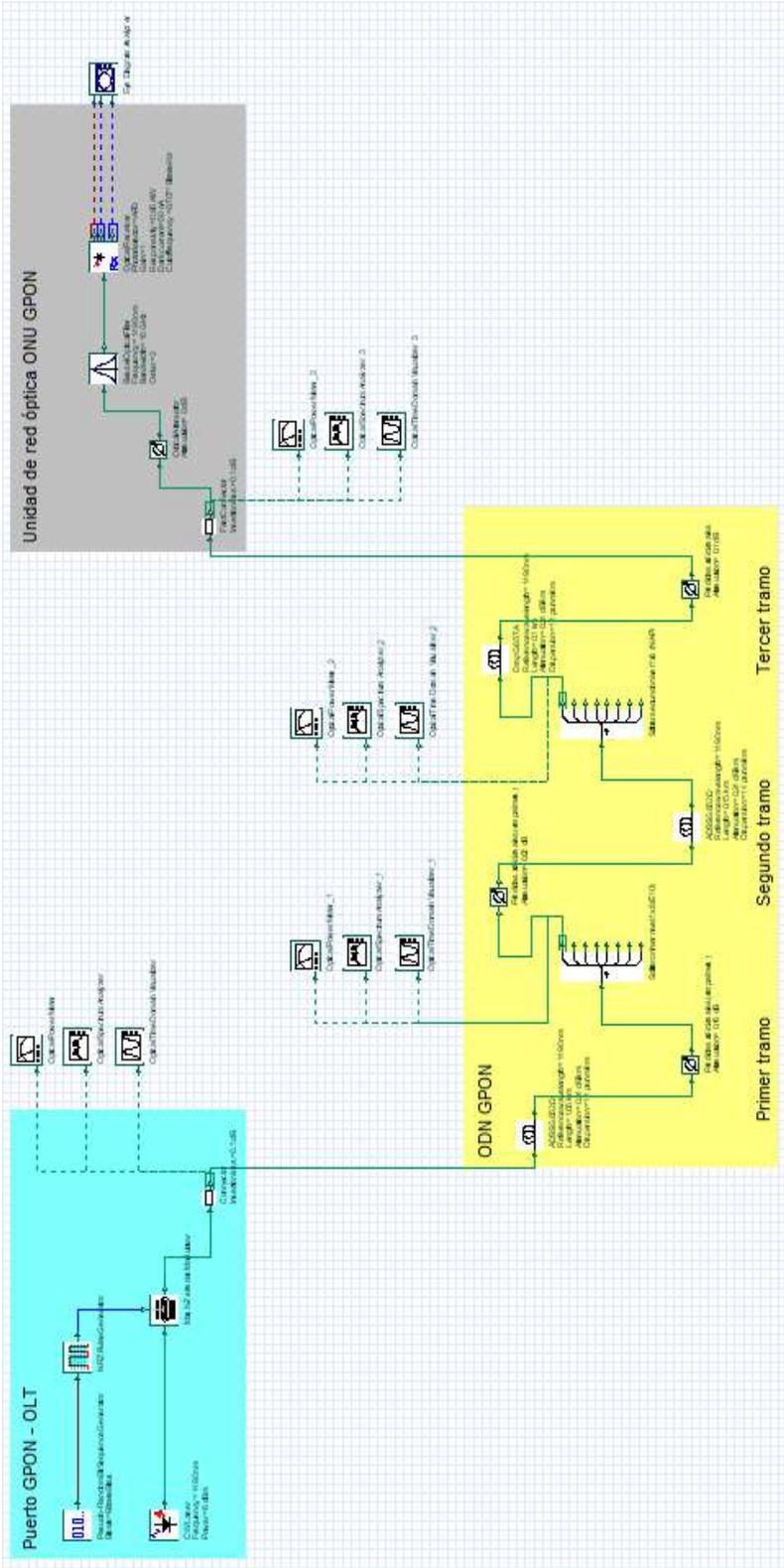
Symmetrical 9.953Gbps OLT

The LTF627X is intended for NG-PON2 OLT application in four separate SFP+ housing. It is a series modules and each module is configured with a L-band 9.95328Gbps downstream transmitter and a C-band 9.95328Gbps upstream receiver which work in TDM configuration. The transmitters can be controlled by the LVTTTL Tx_DISABLE function and the receivers incorporates the LVTTTL Rx_SD output.

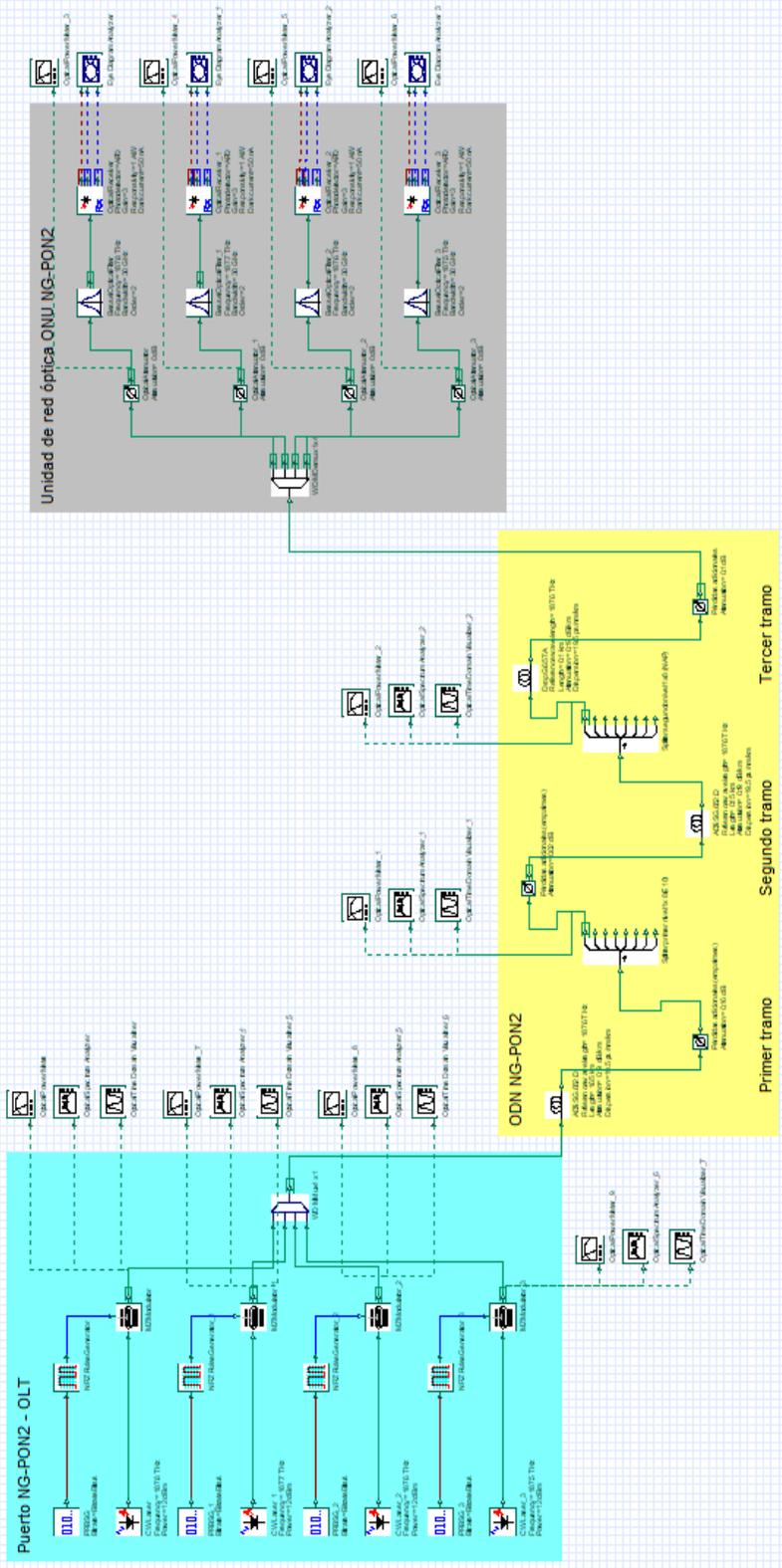
Product Name	Part Number	Package	Interface	Reach	Temp
NG-PON2 OLT	LTF627X-BC+ LTF627X-BCA+	SFP+	SC	20km	C

Tx Output	Tx Rate	Tx Wavelength	Rx Input	Rx Rate	Rx Wavelength
5.2~8.2dBm 7.2~10.2dBm	9.953Gb/s	1596.34/1597.19/ 1598.04/1598.89nm	-29.2dBm -30.6dBm	9.953Gb/s	1524~1544nm

Anexo J. Esquema general de la red GPON del usuario más lejano en Optisystem

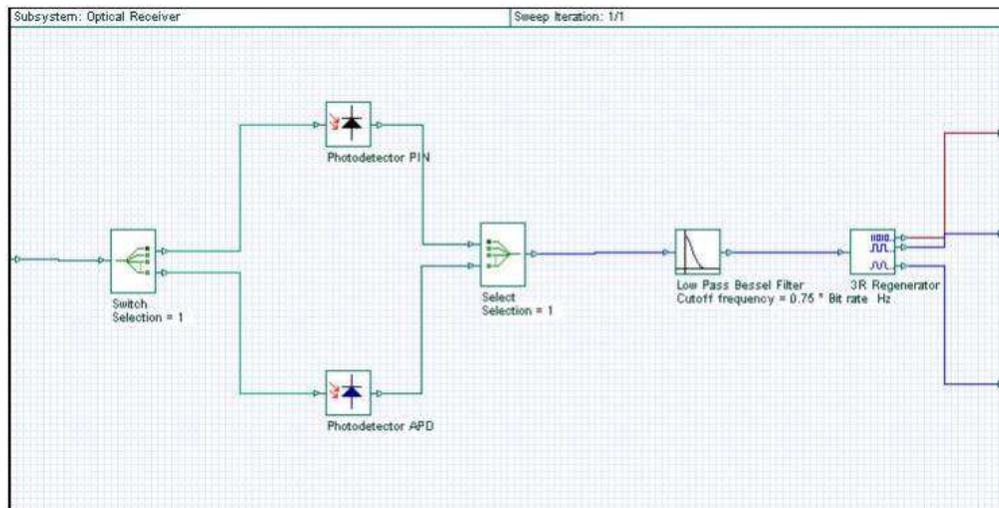


Anexo L. Esquema general de la red NG-PON2 del usuario más lejano en Optisystem

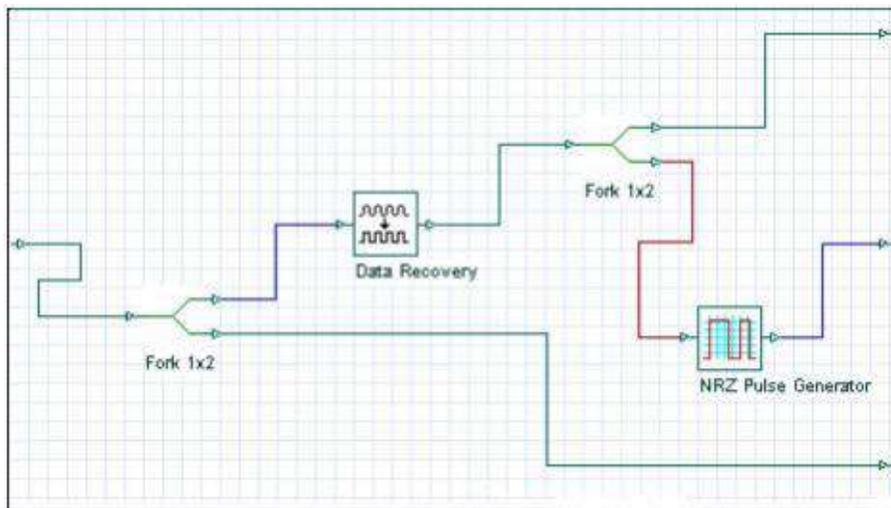


Anexo M. Esquema del receptor óptico y el generador 3R de Optisystem.

El receptor óptico es un subsistema que fue implementado utilizando dos tipos de fotodetectores, un filtro pasabajo de Bessel y un regenerador 3R. Las propiedades del componente permiten selección de parámetros internos del componente. Dependiendo de la selección entre PIN y APD, los componentes de conmutación/selección redirigirán la señal al tipo de fotodetector.



En cuanto al generador 3R, genera la secuencia de bits original y una señal eléctrica modulada para el análisis de la tasa de error de bits (BER). Está basado en un componente de recuperación de datos y un generador de pulsos NRZ.



Anexo N. OLT Series MA5800 HUAWEI con soporte para GPON, XG-PON y XGS-PON

Product Specifications			
Product Indicator	 MA5800-X17	 MA5800-X15	 MA5800-X7
H x W x D (mm)	486 x 493 x 287	486 x 442 x 287	263.9 x 442 x 268.7
Payload switching capacity of the control board	MPLA/MPLB: 7 Tbit/s MPLG: 7.3 Tbit/s		
Maximum payload bandwidth per service slot	200 Gbit/s		
Number of concurrent 4K video users	16000		8000
Power supply mode	DC power supply (dual for backup)		
Rated voltage	-48 V/-60 V		
Ambient temperature	-40 °C to +65 °C* (normal operation) Minimum startup temperature: -25 °C * +65°C indicates the temperature of the air intake vent of the service subrack.		
GPON/XG-PON/ XGS-PON ports	16 x 17 = 272	16 x 15 = 240	16 x 7 = 112
Upstream ports (Dual control boards for upstream transmission)	MPLA/MPLB: 8 x 10GE/GE MPLG: 2 x 100GE + 4 x 10GE/GE		

Anexo O. Código en Python para el ajuste exponencial de los datos obtenidos, a partir de un archivo Excel .xlsx.

```

# Importar las librerías necesarias
import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import seaborn as sns
from scipy.optimize import curve_fit

# Definir una función exponencial
def exponential_func(x, a, b):
    return a * np.exp(b * x)

# Leer datos desde un archivo de Excel extrayendo la Hoja requerida
data = pd.read_excel('C:\\Users\\YORS\\Desktop\\Python_Excel\\Análisis_Regresion.xlsx', sheet_name='Hoja1')

# Extraer los datos de las columnas de la hoja
x_data = data['PRx'].values
y_data = data['Factor Q'].values

# Ajustar la curva exponencial a los datos
params, covariance = curve_fit(exponential_func, x_data, y_data)

# Obtener los parámetros ajustados
a, b = params

# Generar datos ajustados para la visualización
x_fit = np.linspace(min(x_data), max(x_data), 100)
y_fit = exponential_func(x_fit, a, b)

# Calcular los valores predichos
y_pred = exponential_func(x_data, a, b)

# Calcular el coeficiente de determinación (R^2)
residuals = y_data - y_pred
ss_res = np.sum(residuals**2)
ss_tot = np.sum((y_data - np.mean(y_data))**2)
r_squared = 1 - (ss_res / ss_tot)

# Calcular el error absoluto y el error porcentual
error_absoluto = np.abs(y_data - y_pred)
error_porcentual = (error_absoluto / y_data) * 100

# Configurar el estilo de seaborn
sns.set(style="whitegrid")

# Graficar los datos originales y la curva ajustada
plt.figure(figsize=(10, 6))
sns.scatterplot(x=x_data, y=y_data, label='Datos originales', s=100)
sns.lineplot(x=x_fit, y=y_fit, label=f'Ajuste exponencial: y = {a:.4f} * e^{(b:.4f) * x}', color='red')
plt.xlabel('Potencia de recepción (dBm)')
plt.ylabel('Factor Q')
plt.legend()
plt.title('Regresión Exponencial')
plt.text(0.05, 0.95, f'$R^2 = {r_squared:.4f}$', transform=plt.gca().transAxes,
        fontsize=14, verticalalignment='top', bbox=dict(boxstyle='round,pad=0.5', edgecolor='black', facecolor='white'))

plt.show()

```

```

# Crear un DataFrame comparativo
comparison_df = pd.DataFrame({
    'X': x_data,
    'Y Original': y_data,
    'Y Ajustado': y_pred,
    'Error Absoluto': error_absoluto,
    'Error Porcentual (%)': error_porcentual
})

# Imprimir el DataFrame comparativo
print(comparison_df)

# Imprimir los parámetros ajustados y el coeficiente de determinación
print(f'Parámetro a: {a}')
print(f'Parámetro b: {b}')
print(f'Coeficiente de determinación (R^2): {r_squared}')

```

