



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Dpto. de Comunicaciones

Análisis comparativo de los estándares, XGPON,  
XGSPON, como alternativa a las tecnologías actuales  
utilizadas en redes de acceso FTTH en la ciudad de Loja,  
Ecuador mediante el simulador Optisystem

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Tecnologías, Sistemas y Redes de  
Comunicaciones

AUTOR/A: Saavedra Cañar, Cristian

Tutor/a: Reig Pascual, Juan-De-Ribera

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024

*Objetivos —*

- Analizar, comparar y evaluar las características de los estándares XG-PON y XGS-PON, con base en las recomendaciones propuestas por la ITU-T.
- Simular enlaces ópticos, variando parámetros de la red, utilizando el software OptiSystem.
- Recomendar el estándar adecuado a implementar por los ISP de la ciudad de Loja, al realizar la migración de su red de acceso FTTH.

*Metodología —*

Los métodos de investigación utilizados en el desarrollo del presente estudio son:

- Método exploratorio. - mediante el cual se realiza la recopilación de información de los estándares XG-PON y XGS-PON, fundamentados en las recomendaciones ITU-T G987.x e ITU-T G.9807.x, reconociendo las características de diseño, despliegue, parámetros de simulación y coexistencia.
- Método explicativo. - con el objetivo de recomendar el estándar adecuado a implementar por los ISP en la ciudad de Loja - Ecuador, se analizan los resultados obtenidos en el desarrollo de las simulaciones, elaboradas en distintos escenarios de redes de acceso FTTH.

*Desarrollos teóricos realizados —*

Se analiza la parte teórica de los estándares XG-PON y XGS-PON describiendo las principales características de funcionamiento como son: alcance, longitudes de onda y tasas binarias de los enlaces ascendente y descendente. También se realiza una descripción de los tipos de tecnologías de acceso sobre las cuales se implementan este tipo de redes, los elementos activos y pasivos que la conforman; además, se investigó los parámetros, librerías y componentes que se utilizan en el software de simulación.

*Desarrollo de prototipos y trabajo de laboratorio —*

De acuerdo con la información recopilada, se han planteado diferentes escenarios en el software de simulación OptiSystem, mediante el que se obtiene valores de: BER, Factor Q, diagrama de ojo, parámetros con los que podemos realizar la evaluación y comparación de los estándares propuestos en este estudio.

*Resultados —*

Se simuló los escenarios planteados en el software Optisystem y se concluyó que el estándar apropiado para realizar la migración del estándar actual G-PON desplegado en la ciudad de Loja es XGS-PON. El mismo que permite alcanzar mayor distancia y brindar servicio a mayor cantidad de usuarios. Al realizar la migración los ISP tendrán un coste menor ya que el estándar elegido permite la coexistencia con la red actual G-PON.

*Líneas futuras —*

Una vez concluido este estudio, se propone la investigación de redes de fibra óptica, tomando en cuenta las características de los nuevos estándares que propone la ITU-T tales como, NG-PON2, 25 G-PON y 50 G-PON, logrando abarcar no solo la ciudad de Loja sino la provincia, logrando coexistencia de diferentes estándares brindando servicios acordes a las necesidades de cada usuario.

*Abstract —*

En el presente trabajo se ejecutará la simulación de los estándares XGPON, XGSPON, con el objetivo de analizar el estándar adecuado a implementar por los proveedores de servicios de Internet (ISP) en la ciudad de Loja – Ecuador, al realizar la migración de la tecnología GPON en la red de acceso FTTH.

El diseño de la red tomará en cuenta las longitudes de onda, tasas binarias, para los canales ascendente (upstream), descendente (downstream), ancho de banda, longitud del cable y demanda de abonados. Durante la simulación se evaluarán métricas como: tasa de error de bit (BER), factor de calidad (factor Q) y presupuesto óptico; con los resultados obtenidos se elaborarán tablas y gráficas que brinden una solución a la problemática planteada.

Autor: Cristian Paúl Saavedra Cañar, email: [csaaca@teleco.upv.es](mailto:csaaca@teleco.upv.es)

Director 1: Juan Reig Pascual, email: [jreig@dcom.upv.es](mailto:jreig@dcom.upv.es)

Fecha de entrega: 27-06-2024

## **ÍNDICE**

I.	INTRODUCCIÓN.....	6
1.1.	Conceptos teóricos .....	8
1.1.1.	Redes PON (Passive Optical Networks) .....	8
1.1.2.	G-PON (Gigabit-Capable Passive Optical Networks) .....	9
1.1.3.	XG-PON (10-Gigabit-capable Passive Optical Networks) .....	10
1.1.4.	XGS-PON (10-Gigabit Symmetric-capable Passive Optical Networks) .....	11
1.1.5.	MEDIOS DE TRANSMISIÓN .....	12
1.1.5.1.	G.652 .....	12
1.1.5.2.	G.657 .....	13
1.1.6.	Técnicas de tendido de fibra óptica.....	14
1.1.6.1.	Tendido aéreo.....	14
1.1.6.2.	Tendido subterráneo .....	14
1.1.7.	FTTx (Fibre To The X) .....	14
1.1.5.3.	FTTN (Fiber To The Node/Neighborhood) .....	15
1.1.5.4.	FTTC (Fiber To The Curb) .....	15
1.1.5.5.	FTTB (Fiber To The Building) .....	15
1.1.5.6.	FTTH (Fiber To The Home) .....	15
1.1.8.	Optisystem.....	16
II.	ESCENARIOS DE DISEÑO.....	17
2.1.	Escenarios de XG-PON.....	18
2.2.	Escenarios de XGS-PON .....	21
2.3.	Esquema de simulación.....	23
2.4.	Presupuesto de elementos activos de la red XG-PON .....	26
2.5.	Presupuesto de elementos activos de la red XGS-PON .....	26
III.	RESULTADOS .....	27
3.1.	XG-PON.....	27
3.2.	XGS-PON .....	32
IV.	CONCLUSIONES.....	36
	BIBLIOGRAFÍA.....	38

## **ÍNDICE DE FIGURAS**

Fig. 1. Evolución de los estándares PON [1].....	6
Fig. 2. Clasificación mundial de la tasa de suscriptores de FTTH Y FTTB ( <i>Fiber to the Building</i> ) [4]....	7
Fig. 3. Elementos de una red PON [10]. ....	9
Fig. 4. Alcance diferencial máximo [13].....	10
Fig. 5. Radios de flexión de ITU-T G.652 e ITU-T G.657 y atenuación por macroflexión en las categorías de la fibra G.657 [22]. ....	14
Fig. 6. Topologías implementadas en FTTx [24]. ....	15
Fig. 7. Arquitectura de redes de acceso óptico [26]. ....	16
Fig. 8. Ubicación de la ciudad de Loja en la república de Ecuador y distritos de los que se compone. [31].....	17
Fig. 9. Organización de los escenarios diseñados .....	18
Fig. 10. Distancia más cercana 2 km (A hasta B) y distancia más lejana 15 km (A hasta B) en el enlace XG-PON.....	20
Fig. 11. Distancia más cercana 5 km (A hasta B) y distancia más lejana 20 km (A hasta B) para el enlace XGS-PON. ....	22
Fig. 12. Esquema de la simulación realizada de los estándares en <i>Optisystem</i> . ....	23
Fig. 13. Diagrama de red XG-PON y XGS-PON con tecnología FTTH. ....	25
Fig. 14. Factor Q y BER mínimo para distancia más cercana en el enlace descendente.....	27
Fig. 15. Diagrama de ojo y potencia óptica recibida para distancia cercana en el enlace descendente....	28
Fig. 16. Factor Q y BER mínimo para distancia más cercana en el enlace ascendente.....	28
Fig. 17. Diagrama de ojo y potencia óptica recibida para distancia cercana en el enlace ascendente.....	29
Fig. 18. Factor Q y BER mínimo para distancia más lejana en el enlace descendente. ....	29
Fig. 19. Diagrama de ojo y potencia óptica recibida para distancia lejana en el enlace descendente. ....	30
Fig. 20. Factor Q y BER mínimo para distancia más lejana en el enlace ascendente. ....	30
Fig. 21. Diagrama de ojo y potencia óptica recibida para distancia lejana en el enlace ascendente. ....	31
Fig. 22. Factor Q y BER mínimo para distancia más cercana en el enlace descendente.....	32
Fig. 23. Diagrama de ojo y potencia óptica recibida para distancia cercana en el enlace descendente....	32
Fig. 24. Factor Q y BER mínimo para distancia más cercana en el enlace ascendente.....	33
Fig. 25. Diagrama de ojo y potencia óptica recibida para distancia cercana en el enlace ascendente.....	33
Fig. 26. Factor Q y BER mínimo para distancia más lejana en el enlace descendente. ....	34
Fig. 27. Diagrama de ojo y potencia óptica recibida para distancia lejana en el enlace descendente. ....	34
Fig. 28. Factor Q y BER mínimo para distancia más lejana en el enlace ascendente. ....	35
Fig. 29. Diagrama de ojo y potencia óptica recibida para distancia lejana en el enlace ascendente. ....	35

## **LISTA DE ACRÓNIMOS**

APD	Avalanche Photo-Diode
ARCOTEL	Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones
BER	Bit Error Rate
CW	Constant Wave
FTTB	Fiber to the Building
FTTB	Fiber To The Building
FTTC	Fiber To The Curb
FTTH	Fiber to the Home
FTTH	Fiber To The Home
FTTN	Fiber To The Node/Neighborhood
FTTx	Fibre To The X
GEM	Modo de Encapsulación GPON
G-PON	Gigabit Capable Passive Optical Networks
ISP	Internet Service Provider
ITU-T	Unión Internacional de las Telecomunicaciones
NG-PON	Next Generation Passive Optical Networks
NRZ	Non-Return-to-Zero
ODN	Red de Distribución Óptica, Optical Distribution Network
OLT	Terminal de Línea Óptica, Optical Line Terminal
ONU	Unidad de Red Óptica, Optical Network Units
PER	Packet Error Rate
PDOT	Plan de Ordenamiento Territorial
PON	Passive Optical Networks
TDMA	Time Division Multiple Access
WDM	Wavelength Division Multiplexing.
WDMA	Wavelength Division Multiple Access
XG-PON	10-Gigabit-capable passive optical networks
XGS-PON	10-Gigabit Symmetric-capable passive optical networks

## I. INTRODUCCIÓN

La demanda de servicios que requieren mayor ancho de banda en la actualidad obliga a los ISP (*Internet Service Provider*) a mejorar sus redes a medida que avanza la tecnología; servicios de *streaming*, juegos en línea, realidad virtual, son parte del presente y futuro por lo que se debe buscar la manera de obtener los requerimientos solicitados, utilizando nuevas tecnologías que permitan el desarrollo de las telecomunicaciones a un nivel en el que se mantenga un costo - beneficio óptimo, tanto para los ISP como para los usuarios finales.

En respuesta a esto, surgen nuevas redes que mejoran los servicios que ofrecían las antiguas redes de cobre tal como, la arquitectura PON (*Passive Optical Networks*), la cual mediante equipos pasivos y el despliegue de fibra óptica tiene como objetivo principal el acceso a Internet.

Las redes PON permitieron el avance de las comunicaciones. Con el desarrollo del estándar G-PON (*Gigabit Capable Passive Optical Networks*) se alcanzaron tasas binarias de transmisión en el orden de 1 Gbps; con el paso de tiempo fue insuficiente para cubrir el avance de la tecnología, puesto que el desarrollo de diversas plataformas en línea desencadenó un incremento de dispositivos conectados a la red con mayor frecuencia y con ello la necesidad de obtener tasas de transmisión mayores que las ofertadas por G-PON.

Como solución a lo anteriormente expuesto, se desarrollaron recomendaciones para generar las redes NG-PON (*Next Generation Passive Optical Networks*), dentro de las cuales se encuentran comprendidas el estándar XG-PON (*10-Gigabit-capable passive optical networks*) y el estándar XGS-PON (*10-Gigabit Symmetric-capable passive optical networks*); los mismos que se explicaran a fondo en la siguiente sección de conceptos teóricos. En la Fig. 1. se indica el año de desarrollo de los estándares, las tasas de transmisión del enlace descendente (DS) y el enlace ascendente (UP), además, del escenario en el que pueden implementarse.

GPON	XG-PON1	XGS-PON
ITU-T G.984 (2004) DS 2.5G @1490nm UP 1.25G @1310nm Foco: residencial y pequeñas empresas	ITU-T G.987 (2010) DS 10G @1577nm UP 2.5G @1270nm Foco: residencial y empresarial	ITU-T G.9807 (2016) DS 10G @1577nm UP 10G @1270nm Foco: residencial, empresarial y transporte 5G (backhaul y midhaul)

Fig. 1. Evolución de los estándares PON [1].

Con el desarrollo de estas tecnologías se logró la implementación de redes de acceso con fibra hasta el hogar FTTH (*Fiber to the Home*), las cuales son predominantes a nivel mundial llegando a cubrir el 68,25 % para el tercer trimestre de 2023 en comparación a otras tecnologías como el cable

de pares o el cable coaxial. Entre el segundo y tercer trimestre de 2023 el despliegue de FTTH aumentó en un 0,62%. Dentro de los países que tuvieron las tasas de crecimiento más altas se encuentran Argelia, Perú y Pakistán [2].

El número de suscriptores de FTTH en América Latina entre el año 2022 y 2023 han crecido en un 25%. Sin embargo, la mayor parte del territorio falta por cubrir, de forma que, solo el 17,7% de población tiene acceso a Internet con fibra óptica de acuerdo con los datos del tercer trimestre de 2023.

En el caso de Ecuador el total de suscriptores de FTTH representa el 26,1% ubicándolo en el puesto 45 a nivel mundial de los países con más del 25% de penetración en el mercado FTTH, tal como se puede apreciar en la Fig.2, en la que se muestra la clasificación mundial de penetración de FTTH en el mundo [3], [4].

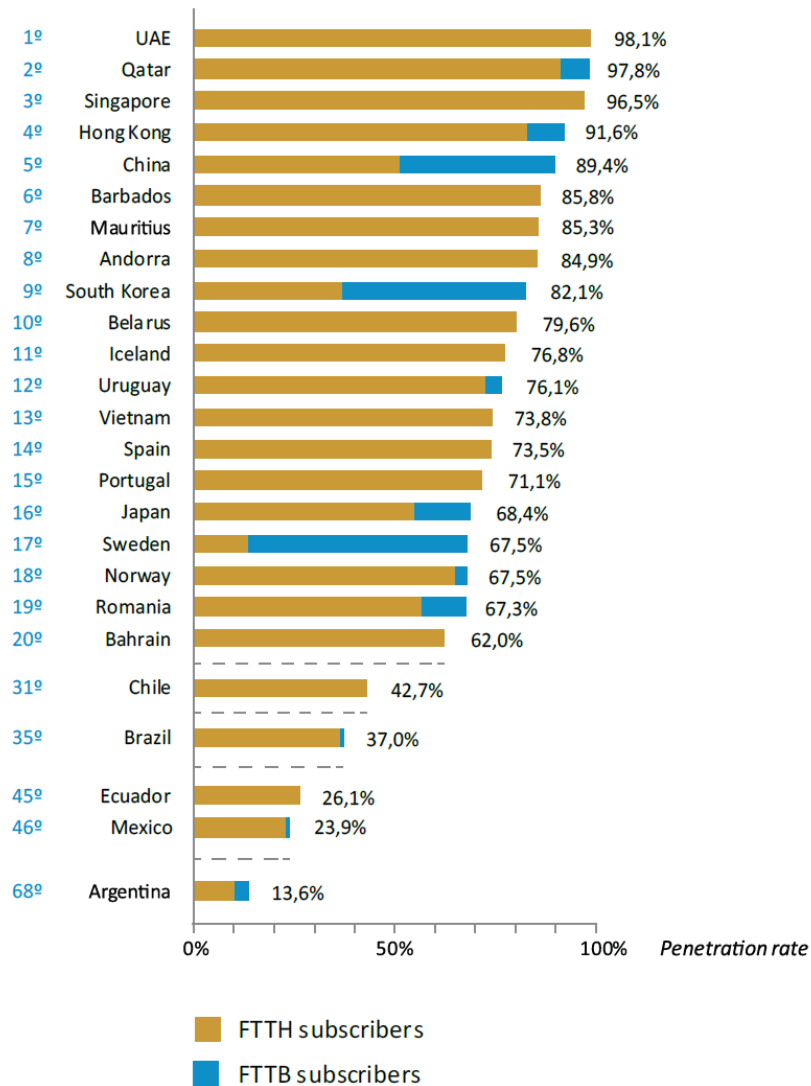


Fig. 2. Clasificación mundial de la tasa de suscriptores de FTTH Y FTTB (*Fiber to the Building*) [4].



Mediante el presente trabajo se analizan y estudian las tecnologías utilizadas en las redes de siguiente generación, para realizar la migración de G-PON en la ciudad de Loja - Ecuador, con la finalidad de brindar un servicio acorde a las necesidades de los usuarios, las cuales cada día son más exigentes con respecto a la necesidad de mayores tasas binarias.

Las tasas binarias ofertadas en el mercado actual FTTH en Loja deben abastecer la creación de contenido y uso de las nuevas plataformas de trabajo, educación y entretenimiento. En Ecuador el ente encargado de regular los servicios de telecomunicaciones es la ARCOTEL (Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones); y acorde con los datos estadísticos que expone, en el año 2022 la provincia de Loja, contaba con un total de 51305 suscriptores con servicio de acceso a Internet mediante tecnologías FTTH, que corresponde al 73,06% de acceso a Internet fijo a través fibra óptica [5].

### *1.1. Conceptos teóricos*

En esta sección se tomarán en cuenta los conceptos teóricos fundamentales en la comprensión del presente trabajo, los cuales se basan en la recopilación de información de los estándares y recomendaciones propuestos por la ITU-T (Unión Internacional de las Telecomunicaciones).

#### *1.1.1. Redes PON (Passive Optical Networks)*

En la actualidad las redes ópticas pasivas o también conocidas como PON son tecnologías utilizadas alrededor del mundo, y se encuentran dentro de las áreas que mayor desarrollo han presentado en el transcurso de los últimos años. Estas redes son utilizadas en topologías punto a punto y punto a multipunto.

A partir del año 2004, numerosos investigadores han trabajado en la evolución de redes PON, desarrollando nuevos estándares que proporcionen comunicaciones con elevadas tasas binarias en enlaces descendente y ascendente, con parámetros de calidad superiores; es decir, que la latencia y el PER (*Packet Error Rate*) sean reducidos y que brinden cobertura a toda la red; con la finalidad de solventar el incremento en dispositivos móviles conectados, mayor demanda en el ancho de banda, servicios multimedia, aplicaciones de alta velocidad, etc. [6], [7].

Entre las principales ventajas de las redes PON se encuentran las siguientes: escalabilidad, versatilidad, y reducción de costos, los elementos con conforman la red no requieren fuentes de alimentación, logrando ser más rentables. El alcance de estas redes se encuentra en un rango de 20 hasta 60 km. [8].

Los componentes principales de una red PON son:

- OLT (Terminal de Línea Óptica, *Optical Line Terminal*), ubicada en el nodo principal, gestiona la información que se transmite hacia la ODN.
- ODN (Red de Distribución Óptica, *Optical Distribution Network*), conecta la OLT y las ONU, ocupando fibra óptica y divisores.
- ONU (Unidad de Red Óptica, *Optical Network Units*), se ubica en el usuario final [9].

En la Fig. 3. se observa los elementos que componen una red óptica pasiva.

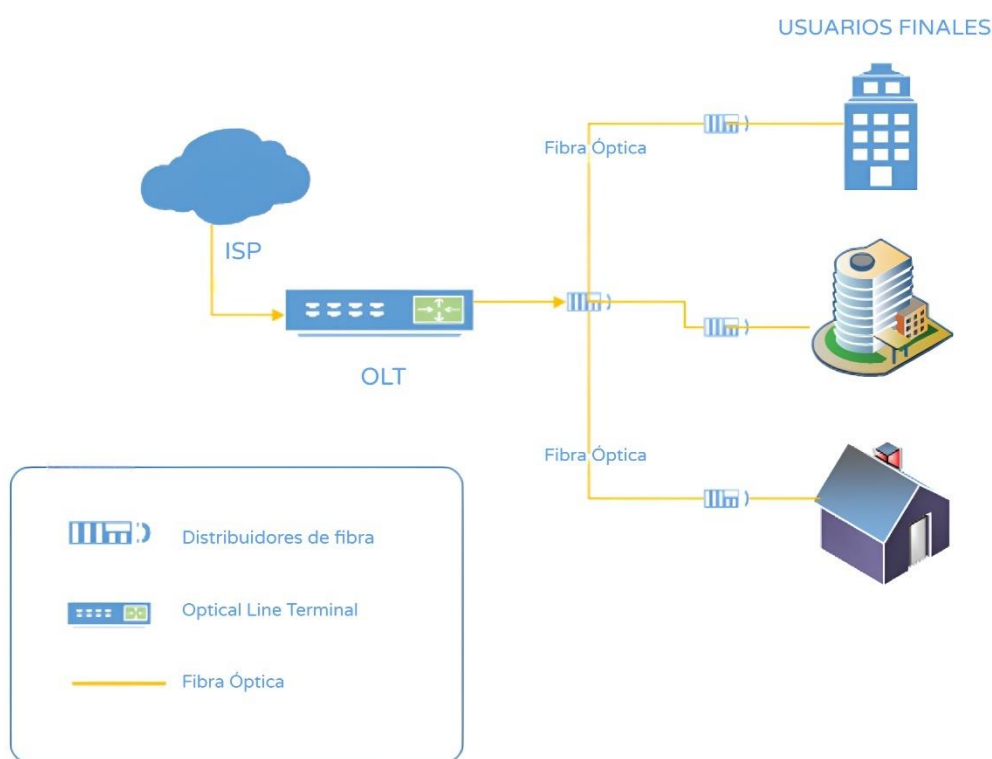


Fig. 3. Elementos de una red PON [10].

### 1.1.2. G-PON (*Gigabit-Capable Passive Optical Networks*)

La red óptica pasiva con capacidad de gigabit o conocida como G-PON, es una tecnología ampliamente utilizada por los ISP para desplegar sus redes hasta el usuario, gracias a su elevada tasa binaria en el envío de datos; además de que mejora la seguridad en las transmisiones y aumenta el ancho de banda [11].

G-PON cuenta con estándares y recomendaciones en ITU-T G.984.x, donde se indican las características principales para esta tecnología, tales como:

- Velocidad del canal ascendente de 1,244 Gbit/s.
- Velocidad del canal descendente de 2,488 Gbit/s.
- El “ratio” de división óptica para el número de abonados es 1:64. Sin embargo, se puede llegar a utilizar “ratios” de 1:128, teniendo en cuenta un mayor nivel de potencia en el módulo óptico.
- Técnica de transmisión WDM (*Wavelength Division Multiplexing*).
- Longitud de onda del enlace ascendente: 1310 nm.
- Longitud de onda del enlace descendente: 1490 nm [12].
- Alcance físico diferencial máximo de 20 km, es decir, que la diferencia máxima entre la ONU más cercana y la ONU más lejana es 20 km, tal como se muestra en la Fig. 4.

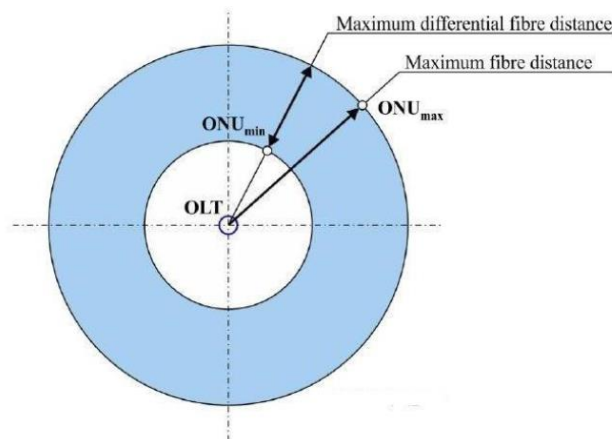


Fig. 4. Alcance diferencial máximo [13].

### 1.1.3. XG-PON (10-Gigabit-capable Passive Optical Networks)

La red XG-PON o también conocida como red óptica pasiva con capacidad de 10 Gb/s, es la evolución de las redes G-PON. Esta tecnología se encuentra estandarizada por la ITU-T G.987.x, en sus recomendaciones se encuentran las principales características de diseño e implementación, acordes al escenario en el que se necesite desplegar la red.

Las ITU-T indica lo siguiente:

- Longitud de onda ascendente se encuentra en el rango de 1260-1280 nm.
- Longitud de onda descendente se encuentra en el rango de 1575-1580 nm.
- La tasa binaria en el canal ascendente es de 2,488 Gbit/s.
- La tasa binaria en el canal descendente es de 9,995 Gbit/s.
- Número de abonados que admite tiene como requisito mínimo un divisor de 1:64, teniendo en cuenta que se podría aumentar a 1:128 y 1:256.
- La distancia que podría alcanzar se encuentra en un rango de 20 a 60 km [14].

#### 1.1.4. XGS-PON (10-Gigabit Symmetric-capable Passive Optical Networks)

Las redes ópticas pasivas simétricas con capacidad de 10 Gb/s o XGS-PON son la evolución de las redes G-PON y XG-PON. Los escenarios en los cuales se pueden aplicar son equivalentes a los de sus predecesores; es decir, redes residenciales, comerciales, móviles, etc.

El estándar se encuentra recogido en la recomendación ITU-T G.9807.x, donde sus principales características son:

- Canal ascendente de 9,953 Gbit/s.
- Canal descendente de 9,953 Gbit/s.
- La distancia se maneja en el rango de 20 hasta 60 km.
- Las longitudes de onda para el enlace ascendente son de 1260-1280 nm teniendo una longitud de onda central de 1270 nm.
- Las longitudes de onda para el enlace descendente son de 1575-1580 nm con una longitud central de 1577 nm.
- El número de abonados utiliza divisores con relación de 1:64, 1:128 y 1:256 [15].

En la Tabla. 1 se muestra una comparativa de las principales características de las tecnologías que se abordan en la presente memoria y de cómo han ido evolucionando.

<b>Estándar</b> <b>Características</b>	<b>G-PON</b>	<b>XG-PON</b>	<b>XGS-PON</b>
Recomendación ITU-T	G.984.x	G.987.x	G.9807.x
Año de Publicación	2004	2010	2016
Modo de Transmisión	GEM	X-GEM	X-GEM
Modulación	NRZ	NRZ	NRZ

Velocidad canal Ascendente	máx. 1,244 Gbit/s	máx. 2,488 Gbit/s	máx. 9,953Gbit/s
Velocidad Canal Descendente	máx. 2,488 Gbit/s	máx. 9,953 Gbit/s	máx. 9,953Gbit/s
Cantidad máxima de divisores	1:64	1:128	Sobre 1:256
Longitud de onda enlace ascendente	1260-1360 nm	1260-1280 nm	1260-1280 nm
Longitud de onda enlace descendente	1480-1500 nm	1575-1580 nm	1575-1580 nm
Medio de transmisión	G.652/G.657	G.652/G.657	G.652/G.657
Alcance	20 km	20 a 60 km	20 a 60 km
Método de Acceso	TDMA ( <i>Time Division Multiple Access</i> )	WDMA ( <i>Wavelength Division Multiple Access</i> )	WDMA ( <i>Wavelength Division Multiple Access</i> )
Potencia óptica del transmisor	Clase A: -4 – 1 dBm Clase B: 1 – 6 dBm Clase C: 5 – 9 dBm	Clase N1: 2 – 6 dBm Clase N2: 4 – 12,5 dBm Clase E1: 6 – 10 dBm Clase E2: 8 – 16,5 dBm	Clase N1: 2 – 5 dBm Clase N2: 4 – 7 dBm Clase E1: 6 – 9 dBm Clase E2: 8 – 11 dBm
Sensibilidad	Clase A: -27 dBm Clase B: -27 dBm Clase C: -32 dBm	Clase N1: -28 dBm Clase N2: -28, -21,5 dBm Clase E1: -28 dBm Clase E2: -28, -21,5 dBm	Clase N1: -26 dBm Clase N2: -28 dBm Clase E1: -30 dBm Clase E2: -32 dBm

Tabla 1: Características Tecnología PON [16], [17], [18].

### 1.1.5. MEDIOS DE TRANSMISIÓN

A continuación, se detalla los medios de transmisión utilizados con mayor frecuencia en el tendido de fibra óptica tanto en planta externa como en la red de acceso al usuario final.

#### 1.1.5.1. G.652

En la recomendación ITU-T G.652 se encuentran establecidas las características de una fibra óptica monomodo. Se describen los atributos geométricos, mecánicos y de transmisión en un cable con

dispersión cero. La región de longitudes de onda para las que se ha optimizado su despliegue se encuentra entre 1310 y 1550 nm [19]. Son utilizadas generalmente en la red troncal por la robustez que ofrecen y la cantidad de hilos con la que cuenta. Dependiendo de las características de construcción del cable pueden ser utilizadas en instalaciones aéreas sobre postes o subterráneas en ductos.

En la Tabla se presenta las características principales de los 4 tipos de fibra G.652.

<b>Tipo Atributos</b>	<b>G.652.A</b>	<b>G.652.B</b>	<b>G.652.C</b>	<b>G.652.D</b>
Diámetro del campo modal	8,6 – 9,5 $\mu\text{m}$ con tolerancia de $\pm 0.6 \mu\text{m}$			8,6 – 9,2 $\mu\text{m}$ con tolerancia $\pm 0,4 \mu\text{m}$
Pérdida de macroflexión	Máx. 0,1 dB sobre 1550 nm	Máx 0,1 dB sobre 1625nm.		
Atenuación	Máx. 0,5 dB/km en 1310 nm. Máx. 0,4 dB/km en 1550 nm	Máx. 0,4 dB/km en 1310 – 1625 nm. Máx. 0,35 dB/km en 1550 nm	Máx. 0,4 dB/km en 1310 – 1625 nm. Máx. 0,3 dB/km en 1550 nm	Máx. 0,4 dB/km en 1310 – 1625 nm. Máx. 0,3 dB/km en 1530 - 1565 nm
Coefficiente PMD ( <i>Polarization Mode Dispersion</i> )	Máx. 0,5 ps/ $\sqrt{\text{km}}$	Máx. 0,2 ps/ $\sqrt{\text{km}}$	Máx. 0,5 ps/ $\sqrt{\text{km}}$	Máx. 0,2 ps/ $\sqrt{\text{km}}$

Tabla 2: Características de las fibras G.652 [19], [20].

#### 1.1.5.2. G.657

En la recomendación ITU-T G.657 se encuentran establecidas las características de la fibra óptica monomodo para la red de acceso. Se dividen en dos categorías como sigue:

Las fibras de la categoría A poseen las mismas características de transmisión e interconexión que las fibras G.652.D. Son utilizadas para transmisiones en todas las bandas que se encuentran dentro del rango de 1260 a 1625 nm. Dado que las pérdidas por flexión son menores que las fibras G.652, admiten radios de curvatura más pequeños optimizando de esta manera las conexiones de la red FTTH.

Las fibras de la categoría B se desarrollaron para ser utilizadas en edificios. Se optimizaron para su instalación con radios de flexión cortos, siendo utilizadas tanto en tramos interiores como exteriores de la red de acceso. Las bandas de transmisión de estas fibras se encuentran en 1310, 1550 y 1625 nm. [21].

En la Fig. 5 se muestra los radios de flexión especificados en las recomendaciones ITU-T G.652 e ITU-T G.657; además, a la derecha se observa la atenuación por macroflexión que presenta cada una de las categorías de la fibra G.657.

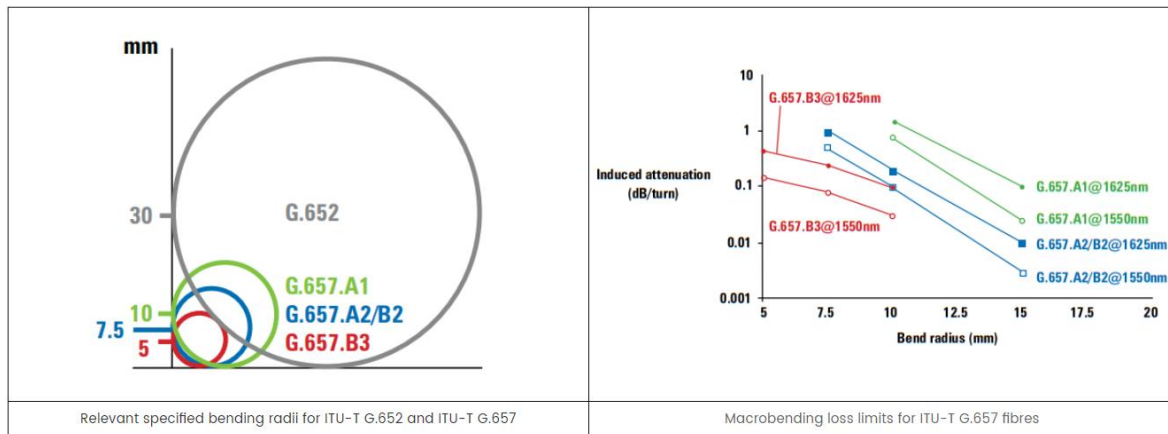


Fig. 5. Radios de flexión de ITU-T G.652 e ITU-T G.657 y atenuación por macroflexión en las categorías de la fibra G.657 [22].

### 1.1.6. Técnicas de tendido de fibra óptica

Entre las técnicas que se utilizan generalmente para el despliegue de fibra óptica se encuentran:

#### 1.1.6.1. Tendido aéreo

Este tipo de redes utiliza postes de hormigón que en su mayoría son de propiedad de la empresa eléctrica. Se caracterizan por:

- Pago de alquiler por el uso de los postes.
- Propensa a daños debido a factores externos.
- Afecta al urbanismo de la ciudad.

#### 1.1.6.2. Tendido subterráneo

Se refiere al despliegue de fibra óptica por medio de tubería, entre sus características se encuentran:

- Su implementación es más costosa.
- Son redes más seguras en comparación a las aéreas [23].

### 1.1.7. FTTx (Fibre To The X)

FTTx es una red de acceso que permite brindar servicio de Internet hasta diversos escenarios mediante fibra óptica: de ello deriva su nombre Fibra hasta “x”. Los proveedores de telecomunicaciones pretenden utilizar al máximo su potencial con nuevas técnicas de transmisión y conexión, acorde con los requerimientos y funciones tales como *triple play*, telefonía, televisión o Internet con alta tasa de transmisión.

De acuerdo al lugar en el que se encuentre ubicado la ONU, las topologías en las que se deriva FTTx y que se utilizan con mayor frecuencia son las que se observan en la Fig. 6.

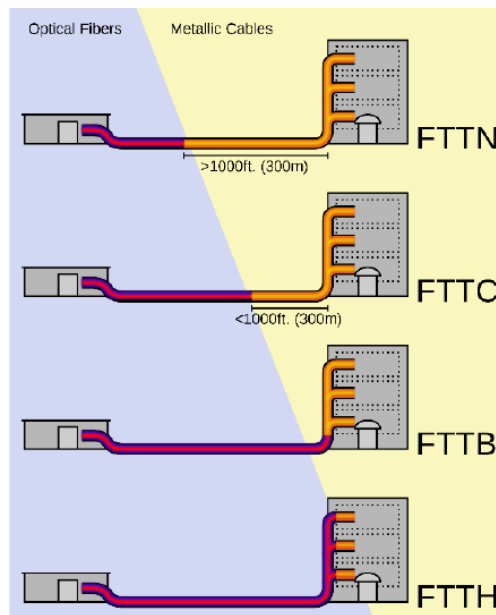


Fig. 6. Topologías implementadas en FTTx [24].

#### 1.1.5.3. FTTN (Fiber To The Node/Neighborhood)

En esta arquitectura la fibra llega hasta el nodo o vecindario, brindando servicio hasta aproximadamente 1000 clientes. El enlace de fibra puede llegar hasta 1 km y el tramo que debe llegar hasta el usuario podría alcanzar una longitud de 300 m; generalmente, dicho tramo se realiza con cable coaxial o cable de cobre.

#### 1.1.5.4. FTTC (Fiber To The Curb)

La fibra llega hasta un bloque de edificios, brindando cobertura a un total aproximado de 500 abonados. La distancia que existe entre el nodo y el usuario es menor que en FTTN.

#### 1.1.5.5. FTTB (Fiber To The Building)

La topología de fibra hasta el edificio se refiere a que el camino de fibra óptica llega hasta el cuarto de telecomunicaciones del edificio, y se distribuye la red hasta el usuario final mediante el uso de cobre [24], [8].

#### 1.1.5.6. FTTH (Fiber To The Home)

La arquitectura de fibra hasta el hogar es la más utilizada. En ella toda la red se compone de fibra óptica. También se conoce como topología de árbol, porque parte desde la OLT, hacia los divisores



ópticos y termina en la ONU del usuario final. El enlace físico de FTTH es de fácil mantenimiento lo que ofrece grandes ventajas sobre otro tipo de redes de acceso.

En la Fig. 7 se observa el esquema básico de una red de acceso FTTH [25].

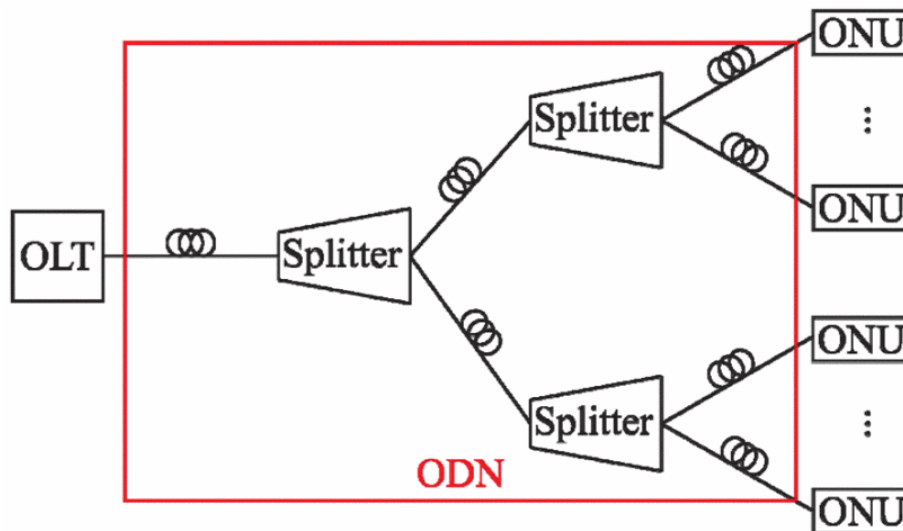


Fig. 7. Arquitectura de redes de acceso óptico [26].

#### 1.1.8. Optisystem

El software integral de diseño de sistemas ópticos “*Optisystem*” es un simulador de la familia de productos desarrollados por la empresa *Optiwave*, que brinda a los usuarios la posibilidad de planificar, verificar y determinar diferentes tipos de enlaces ópticos. Las principales y más frecuentes herramientas de análisis que presenta el software son:

- Diagrama de ojo. Mide las prestaciones del enlace.
- BER (*Bit Error Rate*). De acuerdo con la recomendación ITU G.9807.1 debe ser menor a  $1 \times 10^{-9}$  dBm [27].
- Factor Q. Se define como la relación que existe entre la señal y el ruido de una señal digital presente en el circuito receptor [28].
- Ganancia.

Entre las ventajas que proporciona se encuentran:

- Información general del rendimiento de un enlace, que se obtiene a través del cálculo del BER y el factor Q.
- Aporta información sobre el diseño del enlace óptico a través de la evaluación de los parámetros de sensibilidad.
- Proporciona optimización automática de parámetros considerados en el sistema.

- Proporciona niveles de precisión acordes a las necesidades de los usuarios [29].

## II. ESCENARIOS DE DISEÑO

El escenario en el cual se desarrolla la siguiente investigación es la ciudad de Loja, ubicada al sur de la República del Ecuador, que cuenta con una población de 250 000 habitantes, con una superficie de 120 km<sup>2</sup>. De acuerdo a los datos del Plan de Ordenamiento Territorial (PDOT) del año 2019 - 2023 en la ciudad existen un total de 55702 hogares con servicio de energía eléctrica [30].

Teniendo en cuenta los datos anteriormente expuestos, se puede realizar el diseño y proyección de abonados totales a cubrir con la arquitectura FTTH en el escenario planteado, el cual se puede observar en la Fig. 8, además se observan los 6 distritos en los que se encuentra dividida actualmente la ciudad de Loja.

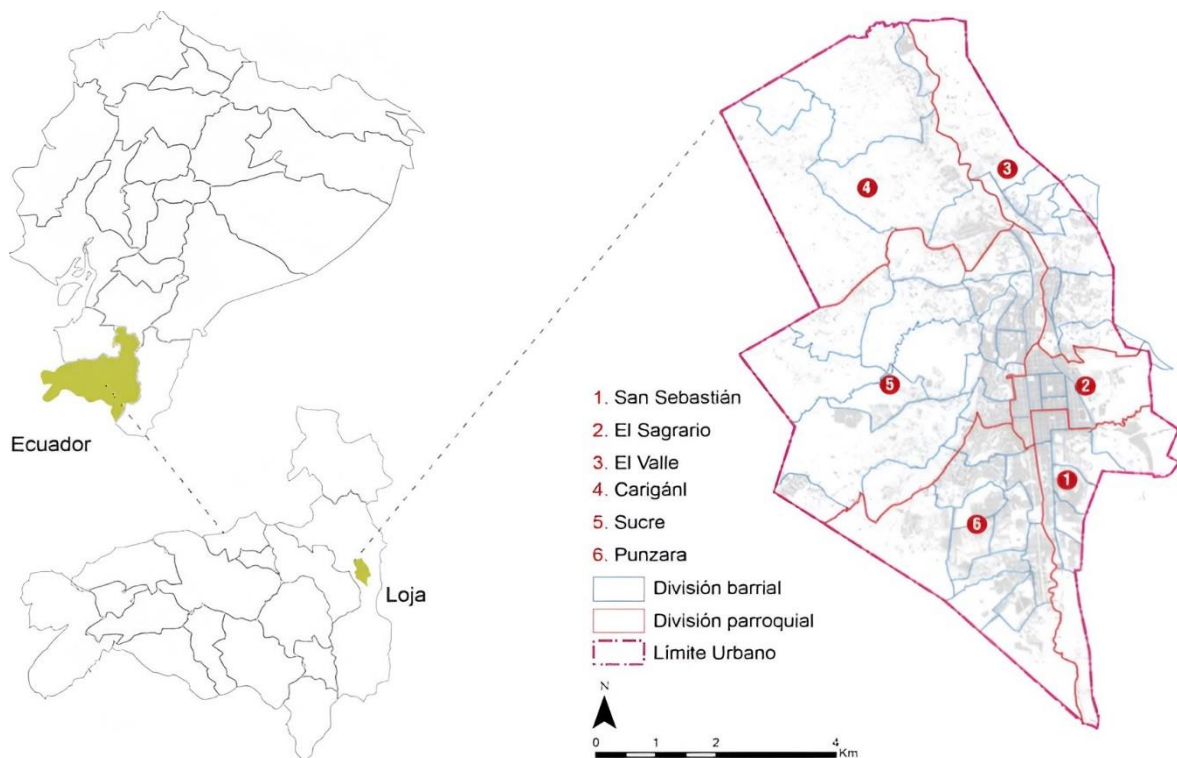


Fig. 8. Ubicación de la ciudad de Loja en la república de Ecuador y distritos de los que se compone. [31]

En la Fig. 9 se muestra un resumen de los escenarios elegidos y los parámetros que se consideran para desarrollar la simulación.

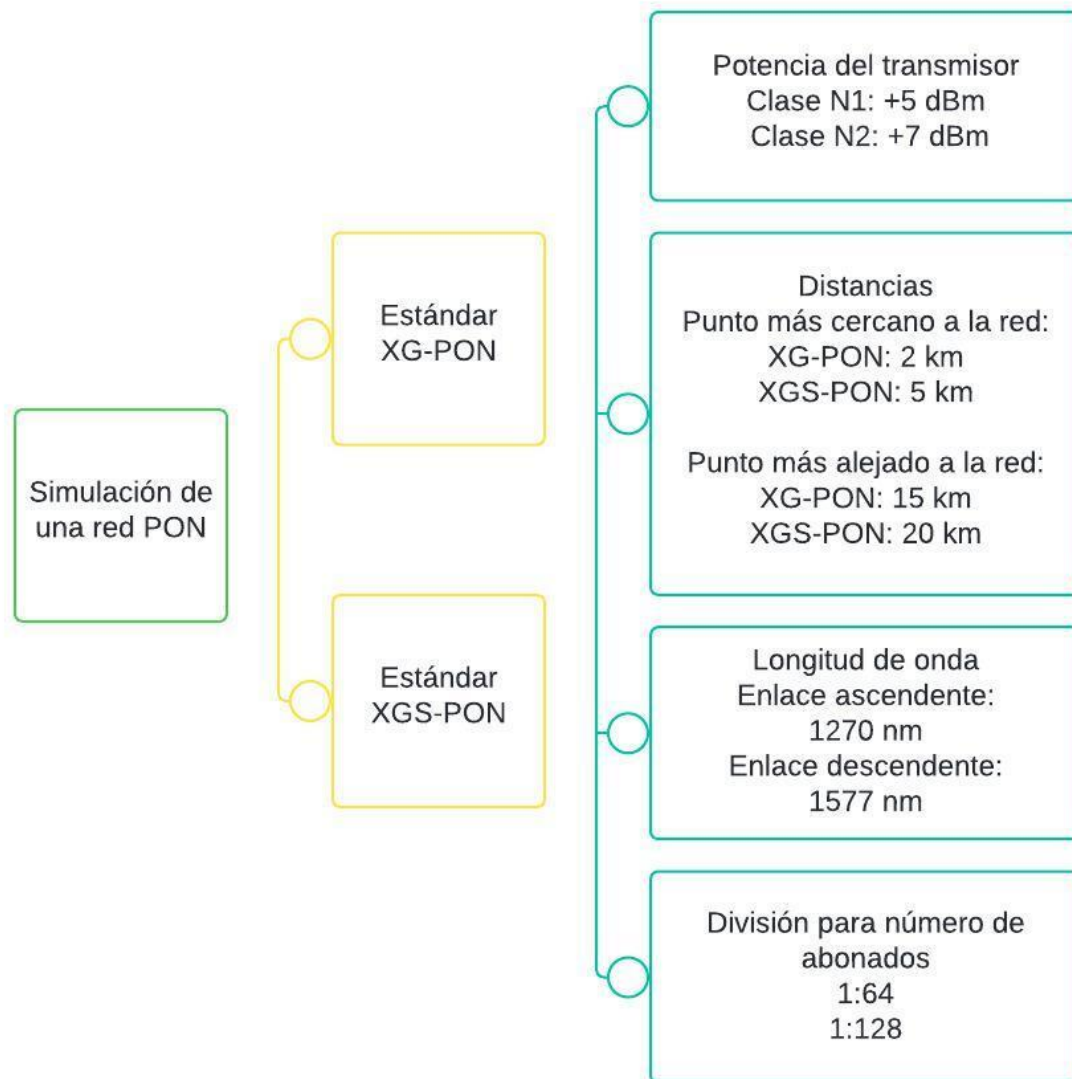


Fig. 9. Organización de los escenarios diseñados

### 2.1. Escenarios de XG-PON

En primer lugar, se diseñan dos escenarios puntuales, para los cuales se varía el alcance que tendrá la red en el punto más lejano y en el más cercano. Para determinar el valor de potencia del transmisor acorde a las distancias de cada escenario se opta por la clase N1, que cuenta con valores en un rango de +2 dBm a +6 dBm; como se indica en los datos registrados en la Tabla 1, el valor que se ha escogido en este caso es de +5 dBm.

En la Tabla 3, se observa los valores de atenuación presentes en cada uno de los parámetros utilizados para realizar el cálculo del balance de potencias óptico y que son necesarios para realizar la simulación.

Elementos de la Red de Fibra Óptica		Cantidad	Pérdida típica del elemento (dB)	Pérdida total (dB)
Conectores		4	0,5	2
Fusiones		4	0,1	0,4
Uniones mecánicas		2	0,1	0,2
<i>Splitter</i>	1:08	2	9,7	19,4
Atenuación en la fibra: longitud de onda – distancia más cercana	1270 nm	2 km	0,44	0,88
	1577 nm	2 km	0,35	0,7
Atenuación en la fibra: longitud de onda – distancia más lejana	1270 nm	15 km	0,44	6,6
	1577 nm	15 km	0,35	5,25

Tabla 3: Parámetros de simulación de red XG-PON.

El valor de la potencia óptica recibida se obtiene mediante:

$$P_r = P_{TX} - \alpha_{TOTAL} \quad (1)$$

Donde:

$P_r$ : Potencia recibida (dBm)

$P_{TX}$ : Potencia máxima de emisión del transmisor óptico (dBm)

$\alpha_{TOTAL}$ : Atenuación total a la longitud de onda especificada (dB)

Como se indicó anteriormente, se plantean dos escenarios, el primero ubicado en el punto más lejano de la red y el otro punto se ubica en el lugar más cercano. El valor de potencia recibida óptica se calcula mediante (1).

Para sustituir los valores de atenuación se tomarán en cuenta los que correspondan a la longitud de onda que se utiliza tanto para enlace ascendente como descendente. El “ratio” de división óptica que se utiliza es 1:64. De esta forma, los cálculos son:

- Distancia más cercana

Enlace ascendente: 1270 nm

$$P_r = 5 - (2 + 0,4 + 0,2 + 19,4 + 0,88) = 5 - 22,88 = -17,88 \text{ dBm}$$

Enlace descendente: 1577 nm

$$P_r = 5 - (2 + 0,4 + 0,2 + 19,4 + 0,7) = 5 - 22,7 = -17,7 \text{ dBm}$$

- Distancia más lejana

Enlace ascendente: 1270 nm

$$P_r = 5 - (2 + 0,4 + 0,2 + 19,4 + 6,6) = 5 - 28,6 = -23,6 \text{ dBm}$$

Enlace descendente: 1577 nm

$$P_r = 5 - (2 + 0,4 + 0,2 + 19,4 + 5,25) = 5 - 27,25 = -22,25 \text{ dBm}$$

En la Fig. 10 se muestra las distancias que se utilizan en el enlace XG-PON. La distancia se realiza desde el punto A el cual se refiere al nodo de la red, hasta el punto más cercano que se ubicaría a 2 km (punto B) y el más lejano que se encontraría ubicado a 15 km (punto B).

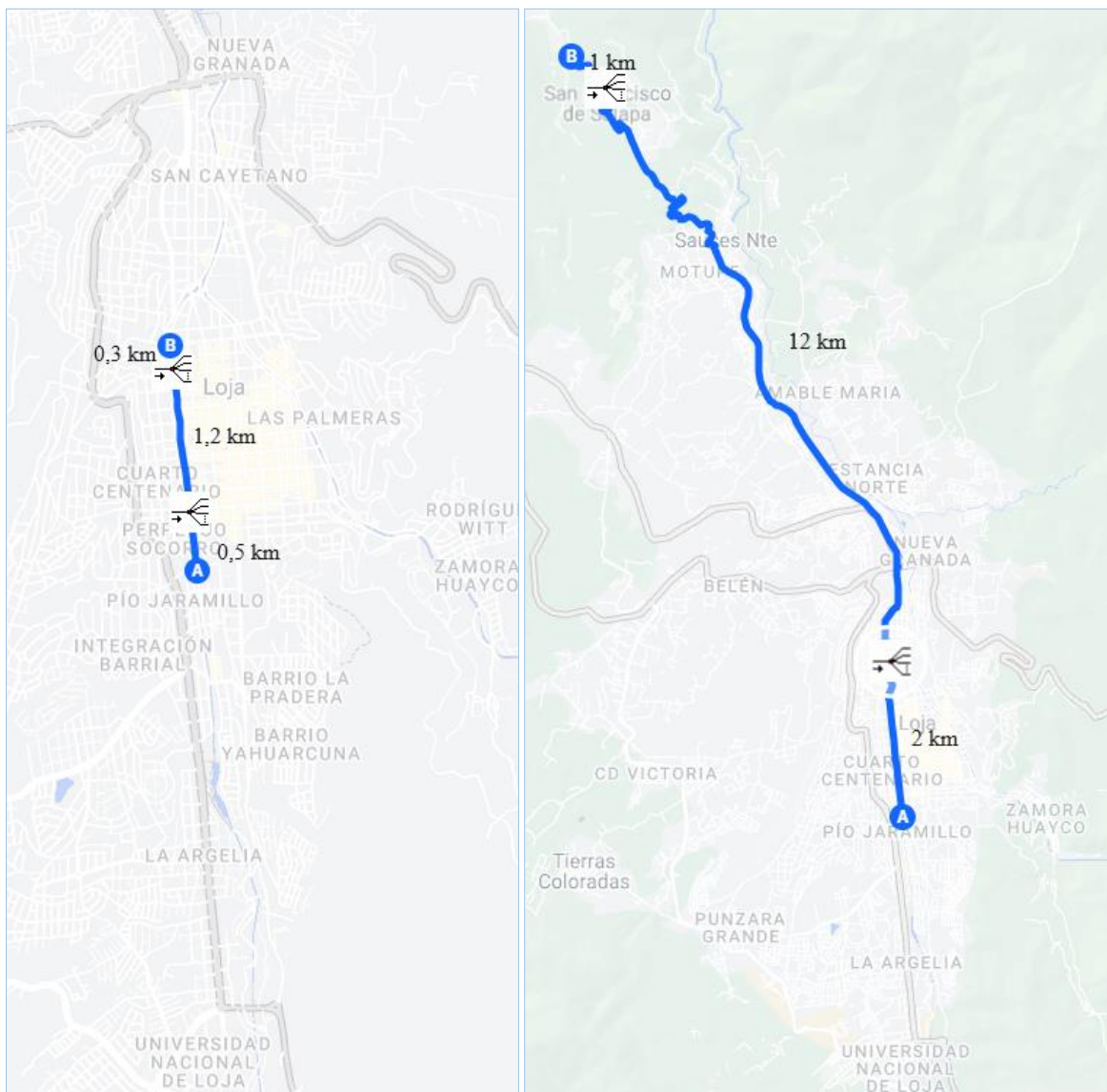


Fig. 10. Distancia más cercana 2 km (A hasta B) y distancia más lejana 15 km (A hasta B) en el enlace XG-PON.

## 2.2. Escenarios de XGS-PON

Al igual que en los escenarios anteriores, se plantean diseños para los puntos más lejano y más cercano de la red. Para determinar el valor de potencia del transmisor se ha elegido trabajar con la clase N2, que cuenta con valores en un rango de +4 dBm a +7 dBm, acorde a los datos registrados en la Tabla 1; el valor que se ha escogido en este caso es el mayor, es decir +7 dBm.

En la Tabla 4, se observa los valores de atenuación presentes en cada uno de los parámetros utilizados para realizar el cálculo de la potencia óptica recibida y que son necesarios para realizar la simulación.

Elementos de la Red de Fibra Óptica		Cantidad	Pérdida típica del elemento (dB)	Pérdida total (dB)
Conectores		4	0,5	2
Fusiones		4	0,1	0,4
Uniones mecánicas		2	0,1	0,2
Splitter	1:08	1	9,7	9,7
	1:16	1	14	14
Atenuación en la fibra: longitud de onda – distancia más cercana	1270 nm	5 km	0,44	2,2
	1577 nm	5 km	0,35	1,75
Atenuación en la fibra: longitud de onda – distancia más lejana	1270 nm	20 km	0,44	8,8
	1577 nm	20 km	0,35	7

Tabla 4: Parámetros de simulación de red XGS-PON.

En este caso se obtiene el valor de potencia óptica recibida de igual manera que en el escenario XG-PON, variando la distancia y con los valores de atenuación correspondientes a cada enlace, la división de abonados se realiza de 1:128, como se muestra a continuación:

- Distancia más cercana

Enlace ascendente: 1270 nm

$$P_r = 7 - (2 + 0,4 + 0,2 + 9,7 + 14 + 2,2) = 7 - 28,5 = -21,5 \text{ dBm}$$

Enlace descendente: 1577 nm

$$P_r = 7 - (2 + 0,4 + 0,2 + 9,7 + 14 + 1,75) = 7 - 28,05 = -21,05 \text{ dBm}$$

- Distancia más lejana

Enlace ascendente: 1270 nm

$$P_r = 7 - (2 + 0,4 + 0,2 + 9,7 + 14 + 8,8) = 7 - 35,1 = -28,1 \text{ dBm}$$

Enlace descendente: 1577 nm

$$P_r = 7 - (2 + 0,4 + 0,2 + 9,7 + 14 + 7) = 7 - 33,3 = -26,3 \text{ dBm}$$

En la Fig. 11 se muestra las distancias que se utilizan en el enlace XGS-PON. La distancia se realiza desde el punto A el cual se refiere al nodo de la red, hasta el punto más cercano que se ubicaría a 5 km (punto B) y el más lejano que se encontraría ubicado a 20 km (punto B).

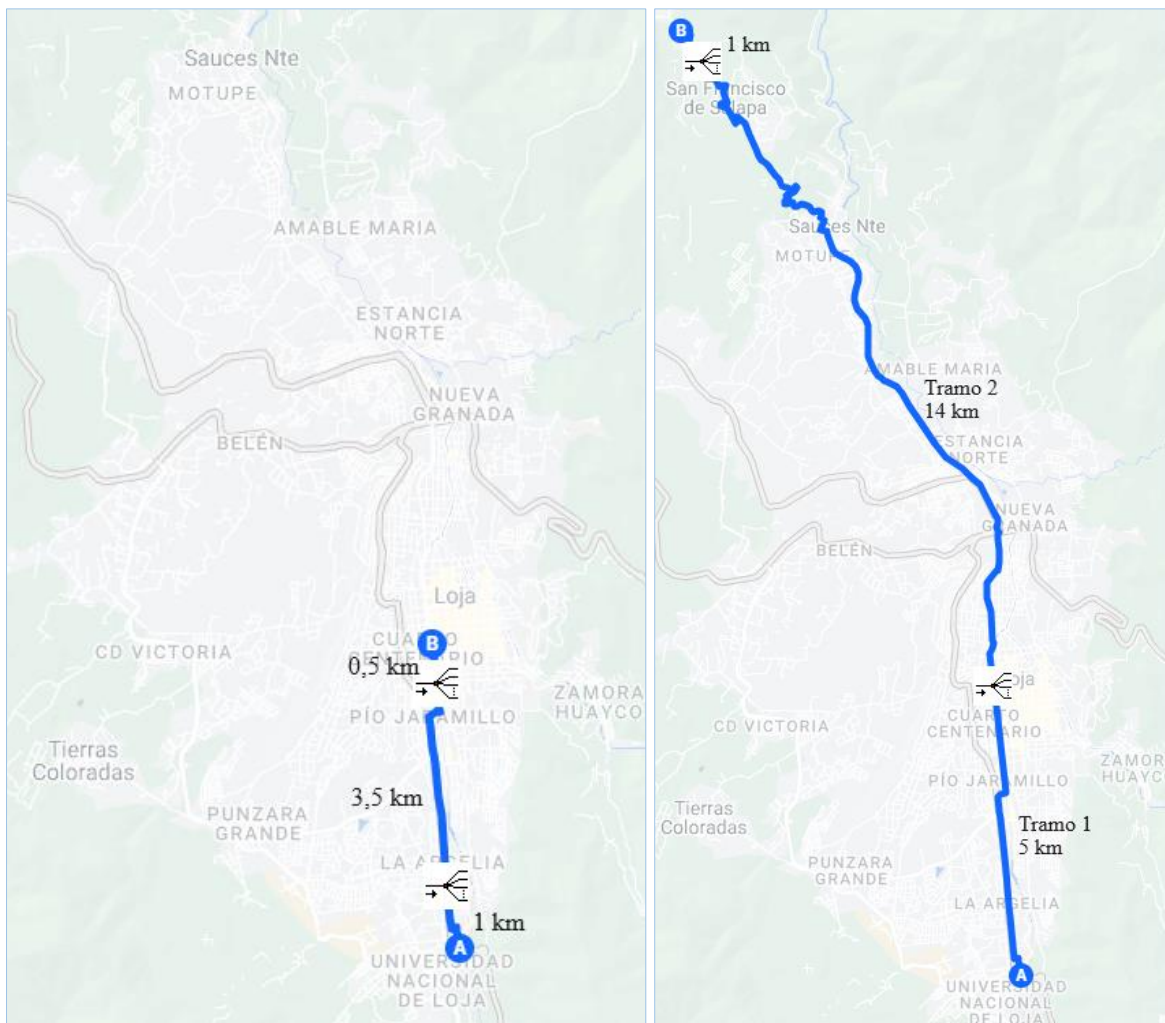


Fig. 11. Distancia más cercana 5 km (A hasta B) y distancia más lejana 20 km (A hasta B) para el enlace XGS-PON.



### 2.3. Esquema de simulación

En el presente apartado se realiza el análisis y comparación de los estándares XG-PON y XGS-PON, para lo cual, se ha diseñado en el simulador *Optisystem* el diagrama típico de una red de acceso a Internet con tecnología FTTH.

En la Fig. 12 se muestra el diagrama de bloques implementado en la simulación, el mismo que cuenta con tres etapas:

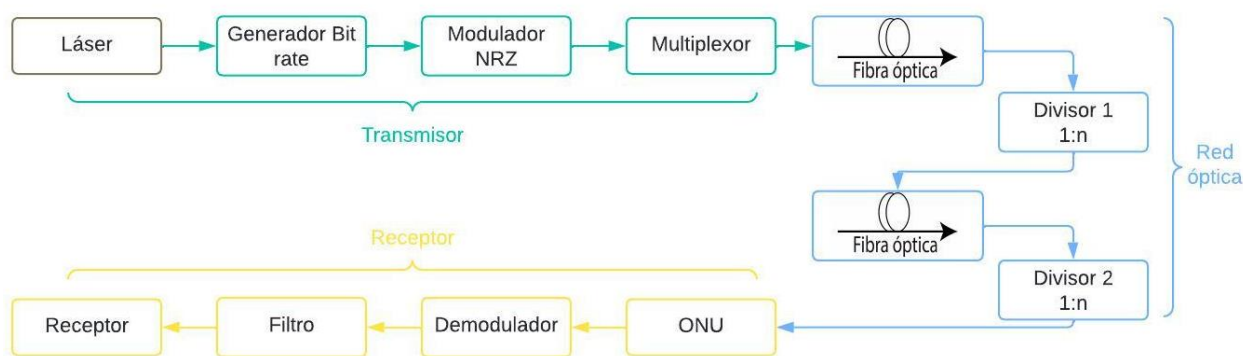


Fig. 12. Esquema de la simulación realizada de los estándares en *Optisystem*.

Las etapas con las que cuenta la simulación se describen a continuación:

Transmisor. - En la primera etapa tal como se muestra en la Fig. 13 se ha diseñado el transmisor de datos OLT, el mismo que cuenta con los diferentes bloques como son:

- Bloque generador de bits. Permite ingresar la tasa binaria con la que va a transmitir la red propuesta. Este módulo genera distintas secuencias de bits, patrones de bits definidos o patrones pseudo-aleatorios.
- Generador de pulsos. Este bloque permite definir la modulación que se va a utilizar en la transmisión de datos. NRZ (*Non-Return-to-Zero*) es el parámetro de modulación elegido de acuerdo con la Tabla 1, el cual envía pulsos digitales con valores de 0 y 1, donde el valor del bit 0 indica un voltaje bajo constante y el valor de bit 1 un voltaje alto constante.
- Laser óptico. Se utiliza como fuente óptica el bloque laser CW (*Constant Wave*). En este módulo se genera la señal óptica y emite una luz continua, permitiendo definir parámetros de longitud de onda, fase y potencia del transmisor.

Cabe indicar que en la topología utilizada se han implementado dos configuraciones de red; es decir, el enlace ascendente y el enlace descendente, por lo cual se han ocupado las longitudes de onda descritas en la Tabla 3 y Tabla 4 del presente documento.



Red óptica. - En la segunda etapa del diagrama que se muestra en la Fig. 13 podemos observar la red óptica de distribución (ODN). En esta parte podemos encontrar los elementos pasivos que conforman la red de acceso, tal como se describe a continuación:

- Cable de fibra óptica. De acuerdo con los escenarios planteados se ha realizado diferentes simulaciones variando las distancias de la red, con sus respectivas atenuaciones, tomando en cuenta los valores descritos en las Tabla 3 y Tabla 4.
- Divisores. Se han tomado en cuenta los bloques para los divisores de potencia, para los dos estándares propuestos, y dependiendo del número de abonados a los que se va a proporcionar servicio, 1:64 y 1:128.
- Conectores. Estos bloques se han agregado al diagrama para simular la atenuación por conectores y fusiones ópticas.

Receptor Óptico. – En la etapa de recepción de la señal como se muestra en la Fig. 13, contamos con los bloques descritos a continuación:

- Filtro óptico. Utilizamos un filtro óptico de Bessel banda-ancha, el mismo que nos permite seleccionar las señales enviadas en las longitudes de onda deseadas y desechar la distorsión generada en la transmisión de la señal.
- Fotodetector. En este bloque se utiliza un fotodetector APD (*Avalanche Photo-Diode*), que es el encargado de convertir la señal óptica en eléctrica. Se utiliza este componente debido a que este tipo de diodos necesitan una señal de corriente mínima para operar y puede utilizar un nivel de potencia incidente mínima para trabajar.
- Filtro paso bajo. Una vez generada la señal eléctrica en el transmisor, se utiliza un filtro paso bajo de Bessel, que permite eliminar las frecuencias de subportadora y obtener la señal en banda.

En la Fig. 13 se muestra el esquema realizado para la simulación del enlace XGS-PON con distancia más lejana. Como se puede observar, existen tres tramos de fibra, los mismos que sumados son 20 km en total, dos divisores, el primero de 1:08 y el segundo de 1:16 brindando servicio a un total de 128 abonados. En la parte amarilla se puede observar las salidas tanto del enlace descendente con longitud de onda 1577 nm, como del enlace ascendente con longitud de onda correspondiente a 1270 nm.

El diagrama que se muestra en la Fig. 13 se utiliza para todos los escenarios de simulación; es decir, para los enlaces de XG-PON y de XGS-PON, variando los parámetros de diseño con base en los datos especificados en la Tabla 3 y la Tabla 4.

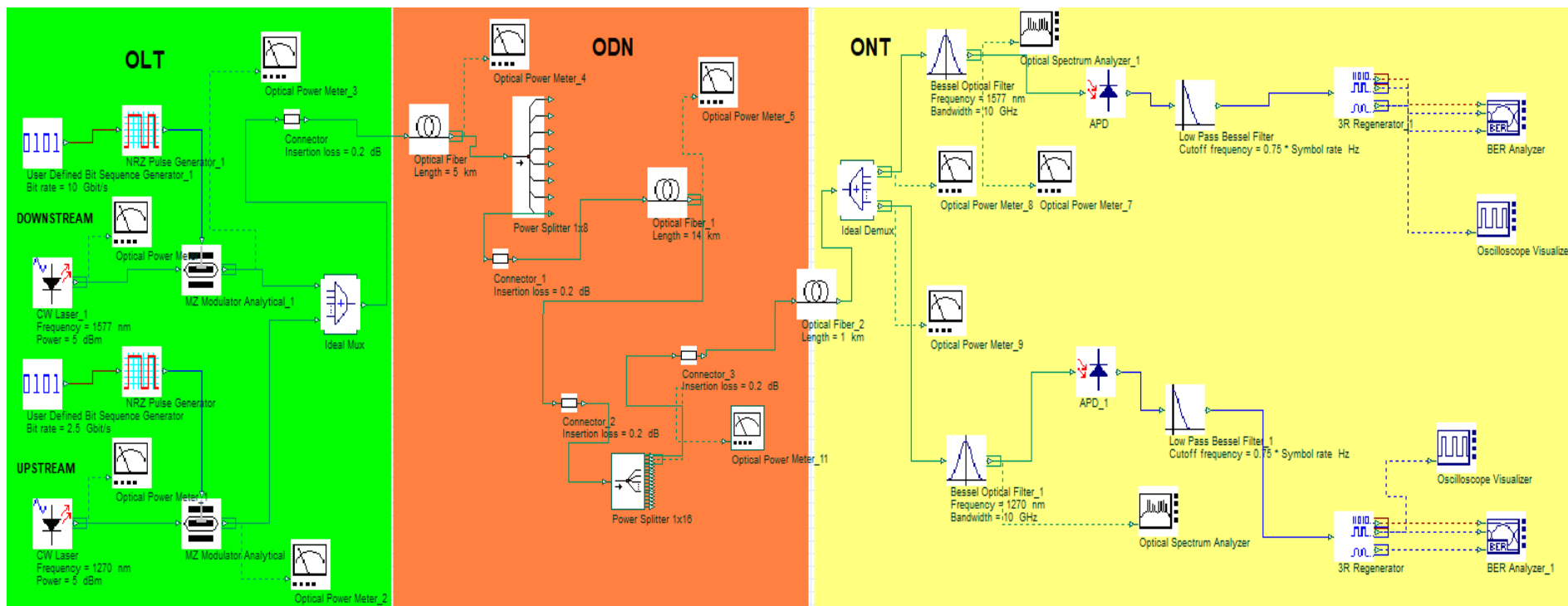


Fig. 13. Diagrama de red XG-PON y XGS-PON con tecnología FTTH.

#### 2.4. Presupuesto de elementos activos de la red XG-PON

En la Tabla 5 se presenta los costos de los equipos que serían necesarios sustituir para desplegar la nueva red, tomando en cuenta que se utiliza la infraestructura desplegada para G-PON.

En este caso se realiza el presupuesto para la migración inicial de 500 abonados. El presupuesto global es de \$ 47329,18; es decir, que por cada abonado pasado a la nueva red se invertiría un valor de \$ 94,66.

Equipo	Modelo	Fabricante	Coste unitario	Cantidad	Total
OLT [32]	Huawei MA5800 X7	Huawei	\$ 3.516,18	1	\$ 3.516,18
ONU [33]	XG-PON Huawei EN8145X6	Huawei	\$ 80,65	500	\$ 40.325,00
Transceptor OLT [35]	SFP + TX-9.95G / RX-2.5G TX-1577nm / RX-1270nm N1 SC DDM	Fibermall	\$ 218,00	16	\$ 3.488,00
<b>Total</b>					<b>\$ 47.329,18</b>

Tabla 5: Presupuesto de equipos activos para la migración de red G-PON a XG-PON.

#### 2.5. Presupuesto de elementos activos de la red XGS-PON

En la Tabla 6 se presenta los costos de los equipos que serían necesarios sustituir para desplegar la nueva red, tomando en cuenta que se utiliza la infraestructura desplegada para G-PON.

En este caso se realiza el presupuesto para un para la migración inicial de 500 abonados. El presupuesto global es de \$ 67181,18; es decir, que por cada abonado pasado a la nueva red se invertiría un valor de \$ 134,36.

Equipo	Modelo	Fabricante	Coste unitario	Cantidad	Total
OLT [32]	Huawei MA5800 X7	Huawei	\$ 3.516,18	1	\$ 3.516,18
ONU [36]	XGS-PON Huawei EN8255X6s-8X	Huawei	\$ 117,25	500	\$ 58.625,00
Transceptor OLT [38]	SFP+ TX-9.95G/RX-9.95G, 2.488G Tx-1577nm/Rx-1270nm SN2 SC UPC DDM	Fibermall	\$ 315,00	16	\$ 5.040,00
<b>Total</b>					<b>\$ 67.181,18</b>

Tabla 6: Presupuesto de equipos activos para la migración de red G-PON a XG-PON.

### III. RESULTADOS

En el presente apartado se exponen los resultados obtenidos a través de la simulación realizada en el software Optisystem, para verificar el rendimiento óptimo y estimar los valores de una red FTTH al aplicar los estándares XG-PON y XGS-PON.

Mediante la simulación se obtienen gráficas del factor Q, BER, diagrama de ojo y la potencia obtenida en el receptor en cada uno de los escenarios planteados en el capítulo anterior.

Los datos que se muestran en las simulaciones deben estar dentro de los valores mínimos y máximos, expuestos en las recomendaciones ITU-T G.987 e ITU-T G.9807. En las normas se especifican que para el factor Q el valor mínimo debe ser igual a 6; mientras que, para el BER el mínimo aceptable es igual a  $1 \times 10^{-12}$ .

La tecnología XG-PON determina -28 dBm como valor mínimo de sensibilidad para la clase N1; con respecto a la tecnología XGS-PON, se utiliza la clase N2 que debe ser inferior a -28 dBm.

#### 3.1. XG-PON

Los resultados del enlace descendente se muestran en la Fig. 14. Los valores del factor Q y del BER se encuentran acordes a lo establecido en la recomendación ITU-T G.987, ya que el valor del factor Q obtenido es 10,5; mientras que, el valor mínimo del BER es igual a  $4,9 \times 10^{-26}$ .

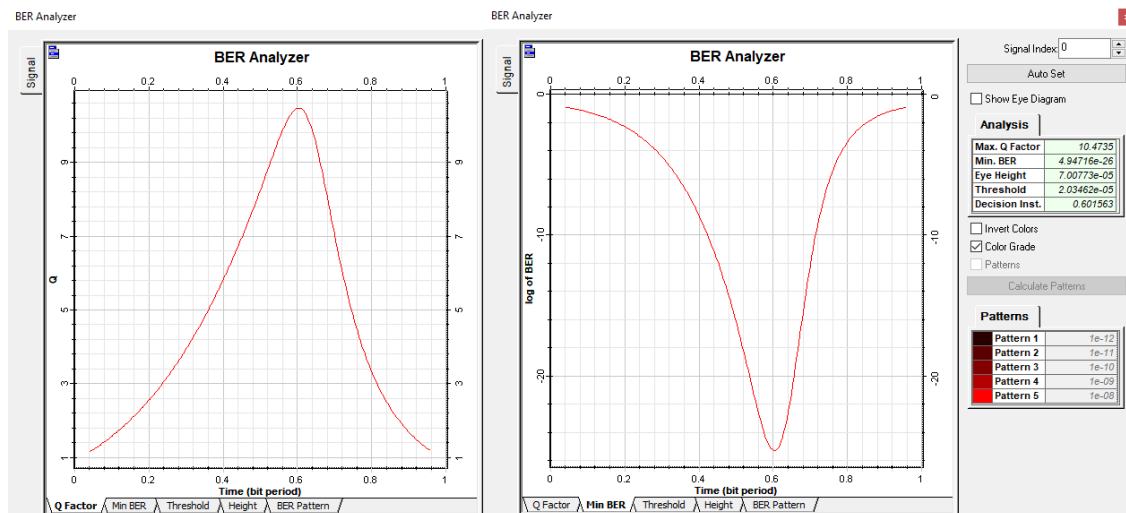


Fig. 14. Factor Q y BER mínimo para distancia más cercana en el enlace descendente.

El diagrama de ojo y la potencia óptica recibida se muestra en la Fig. 15. La potencia medida es de -17,4 dBm, mientras que la potencia calculada de -17,7 dBm, por lo que hay una diferencia de -0,4 dB.

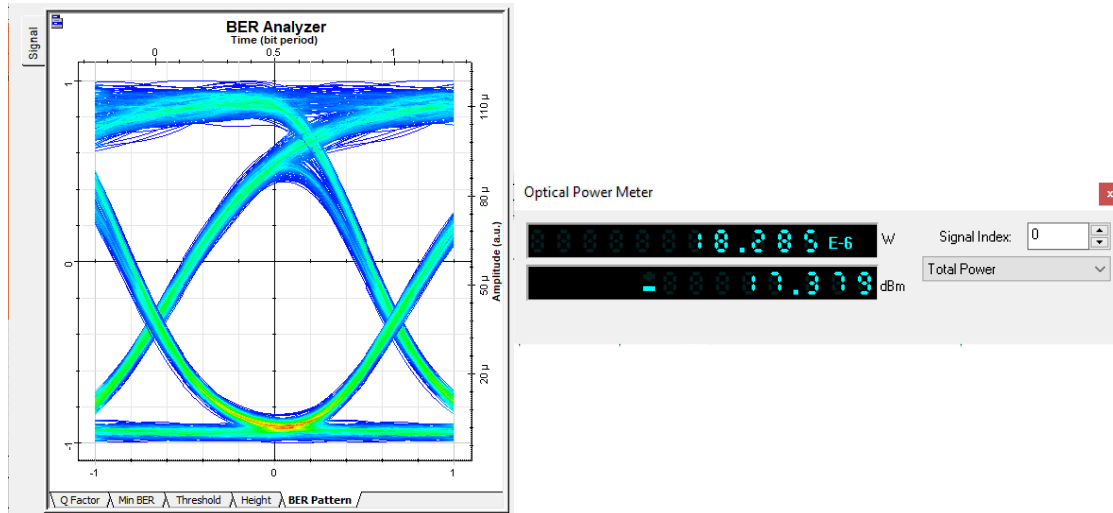


Fig. 15. Diagrama de ojo y potencia óptica recibida para distancia cercana en el enlace descendente.

Los resultados del enlace ascendente se muestran en la Fig. 16. El valor del factor Q obtenido es 12,8; mientras que, el valor mínimo del BER es igual a  $9,4 \times 10^{-38}$ . Por lo tanto, el funcionamiento del enlace es correcto, tanto el factor Q como el BER, se encuentran acordes a lo establecido en la recomendación ITU-T G.987.

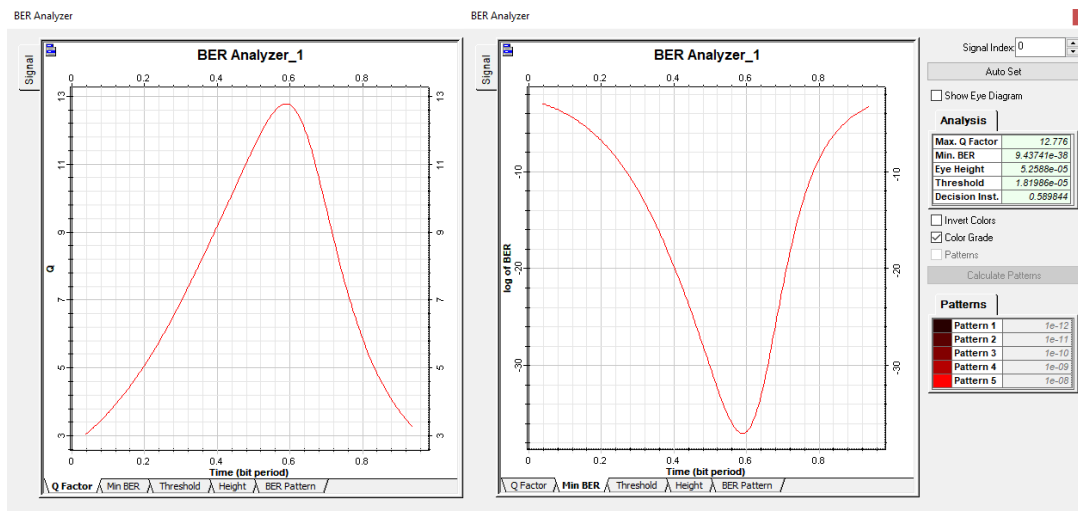


Fig. 16. Factor Q y BER mínimo para distancia más cercana en el enlace ascendente.

El diagrama de ojo y la potencia óptica recibida se muestra en la Fig. 17. La diferencia entre el valor de potencia medido y calculado es de -2 dB.

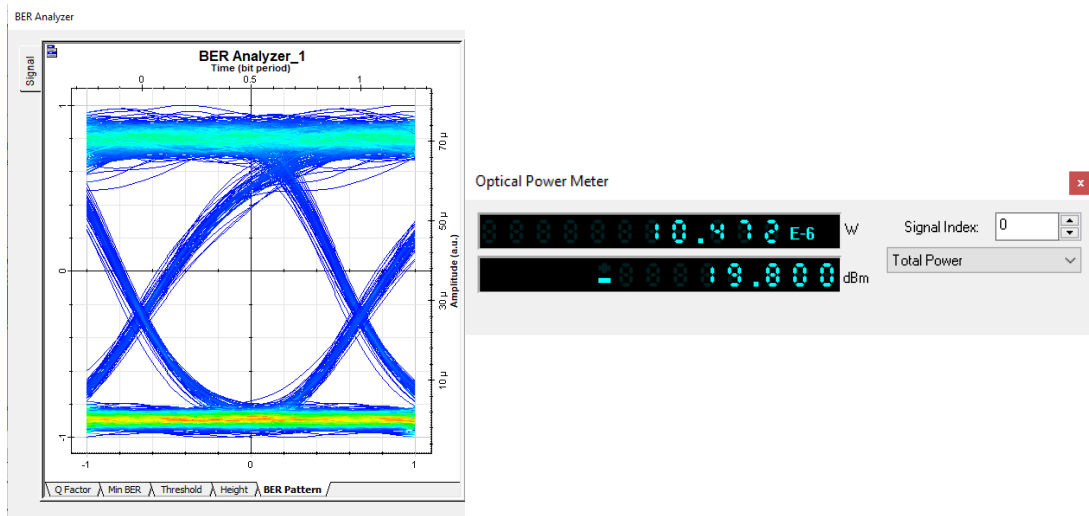


Fig. 17. Diagrama de ojo y potencia óptica recibida para distancia cercana en el enlace ascendente.

Los resultados del enlace descendente se muestran en la Fig. 18. El valor del factor Q obtenido es 8,6; mientras que, el valor mínimo del BER es igual a  $5,2 \times 10^{-18}$ . Por lo tanto, las prestaciones del enlace son las adecuadas, puesto que se verifica que, los valores tanto del factor Q como del BER, se encuentran acordes a lo establecido en la recomendación ITU-T G.987.

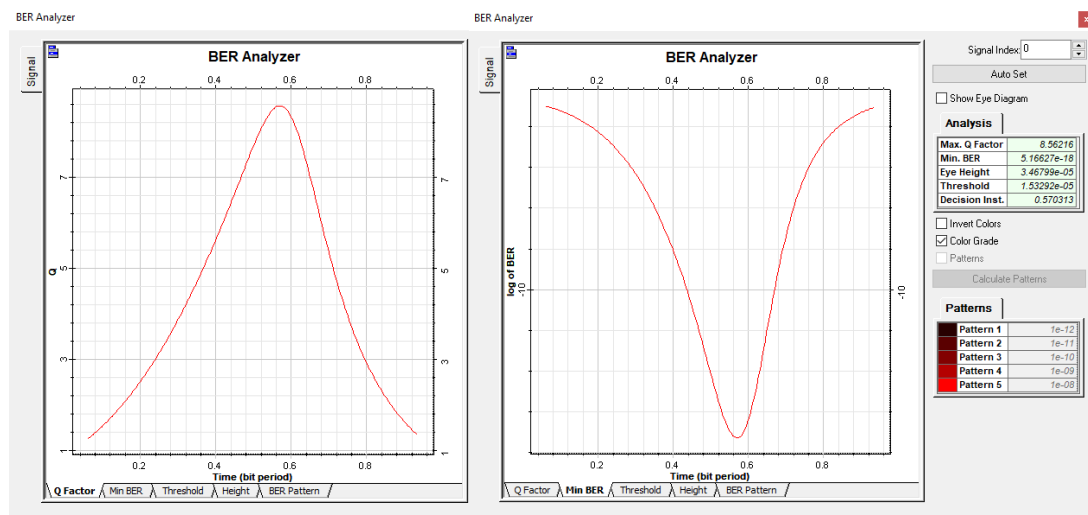


Fig. 18. Factor Q y BER mínimo para distancia más lejana en el enlace descendente.

El diagrama de ojo y la potencia óptica recibida se muestra en la Fig. 19. La diferencia entre el valor de potencia medido y el calculado es de -2,3 dB.

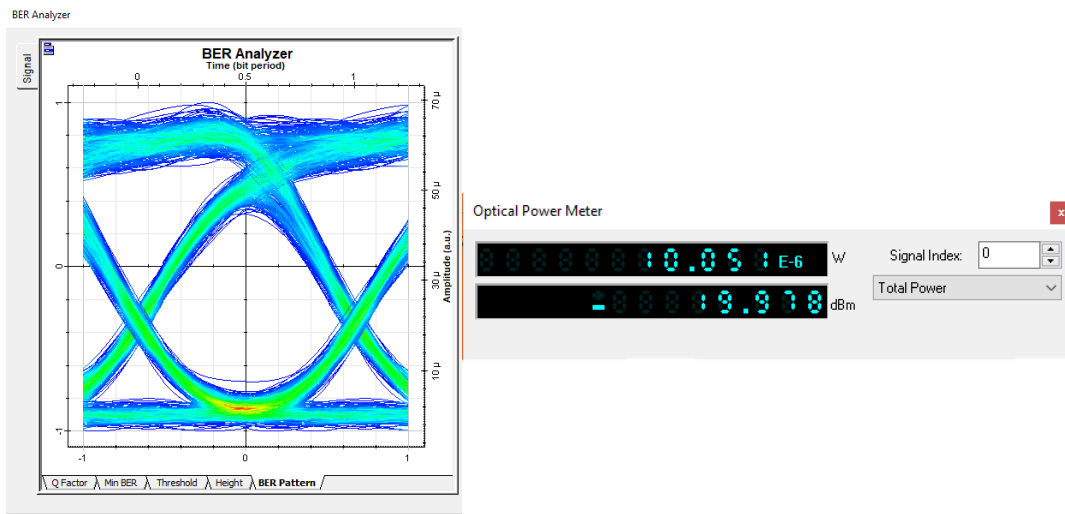


Fig. 19. Diagrama de ojo y potencia óptica recibida para distancia lejana en el enlace descendente.

Los resultados del enlace ascendente se muestran en la Fig. 20. El valor del factor Q obtenido es 9,3; mientras que, el valor mínimo del BER es igual a  $5,4 \times 10^{-21}$ . Por lo tanto, el enlace es viable pues se verifica que, tanto el factor Q como el BER, se encuentran acordes a lo establecido en la recomendación ITU-T G.987.

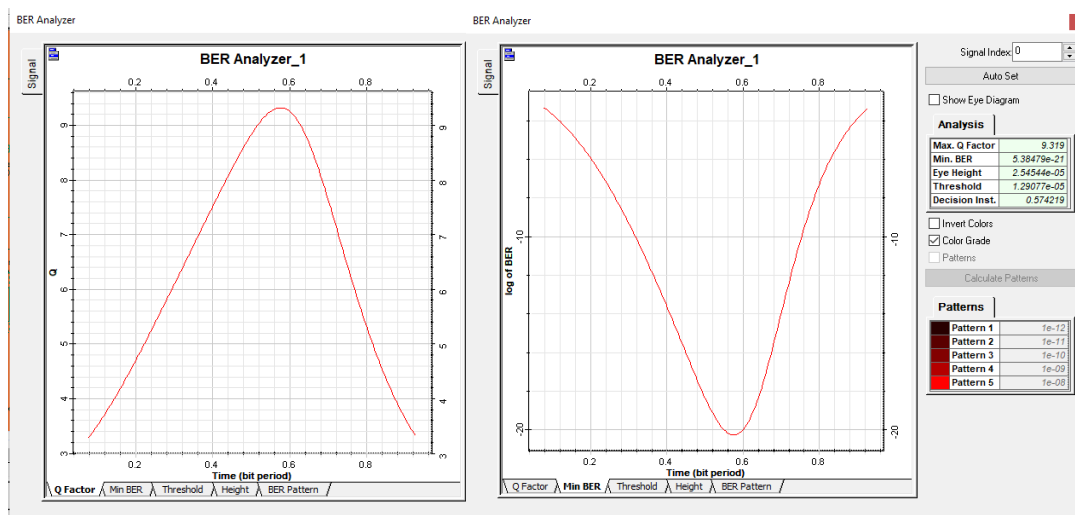


Fig. 20. Factor Q y BER mínimo para distancia más lejana en el enlace ascendente.

El diagrama de ojo y la potencia óptica recibida se muestra en la Fig. 21. La diferencia entre el valor de potencia medido y calculado es de -1,2 dB.

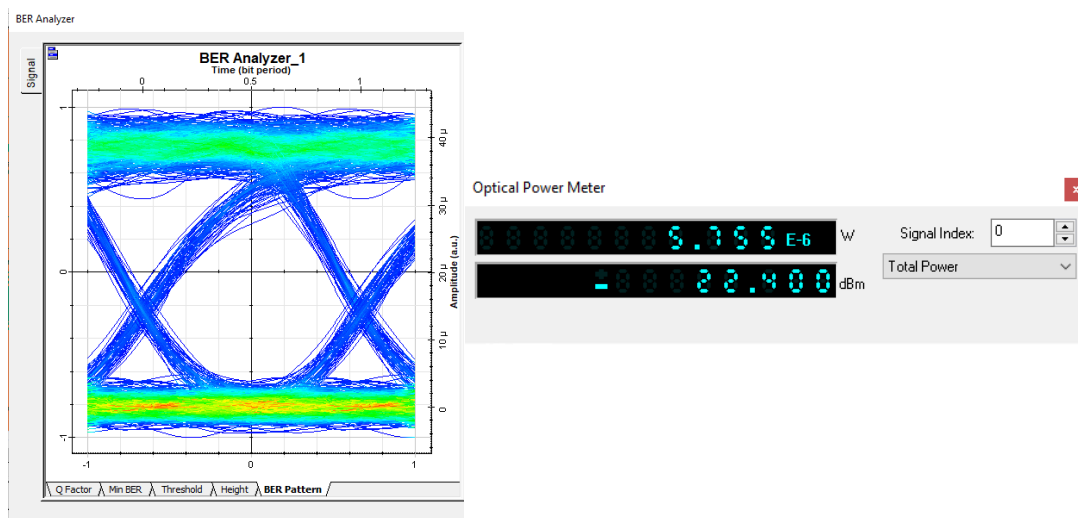


Fig. 21. Diagrama de ojo y potencia óptica recibida para distancia lejana en el enlace ascendente.

En la Tabla 7 se muestra el resumen de las simulaciones en cada escenario planteado.

Parámetro		Enlace			
		Descendente		Ascendente	
Longitud de onda (nm)		1577		1270	
Distancia (km)		2	15	2	15
Potencia (dBm)	Calculada	-17,70	-23,60	-17,88	-22,25
	Simulación	-17,379	-19,978	-19,800	-22,400
Factor Q		10,470	8,562	12,776	9,319
BER		$4,95 \times 10^{-26}$	$5,17 \times 10^{-18}$	$9,44 \times 10^{-38}$	$5,39 \times 10^{-21}$

Tabla 7: Resumen de los valores obtenidos en los escenarios planteados utilizando el estándar XG-PON.



### 3.2. XGS-PON

Los resultados para el estándar XGS-PON deben estar dentro de lo estipulado en la recomendación ITU-T G.9807, los cuáles como se indicó anteriormente en los tres parámetros aquí estudiados son iguales que el estándar XG-PON.

Por lo tanto, en el caso del enlace descendente el factor Q que se muestra en la Fig. 22 es igual a 9,7 y el valor mínimo del BER es  $1,5 \times 10^{-22}$ , valores que indican un correcto funcionamiento del enlace.

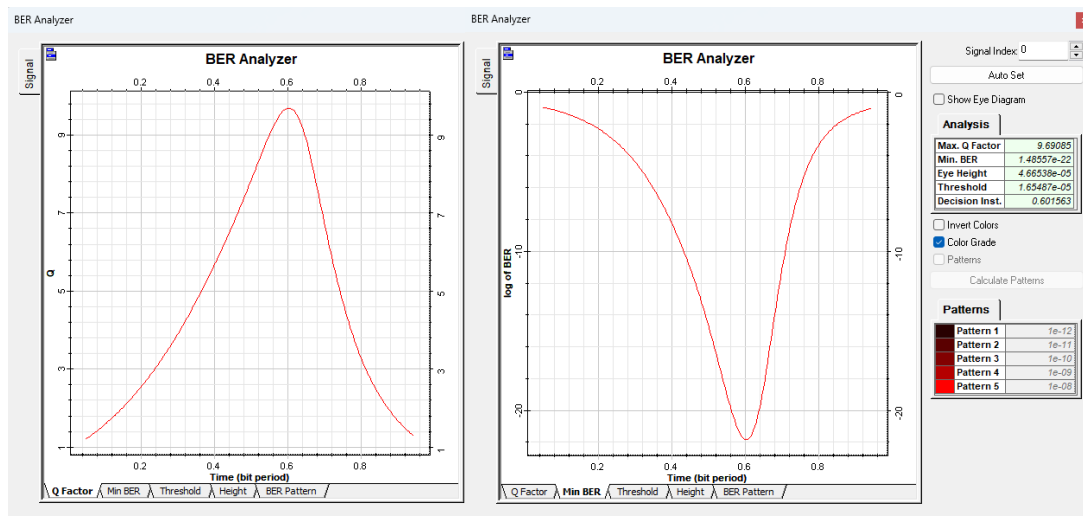


Fig. 22. Factor Q y BER mínimo para distancia más cercana en el enlace descendente.

El diagrama de ojo y la potencia óptica recibida se muestra en la Fig. 23. La diferencia entre el valor de potencia medido y calculado es de -2,06 dB.

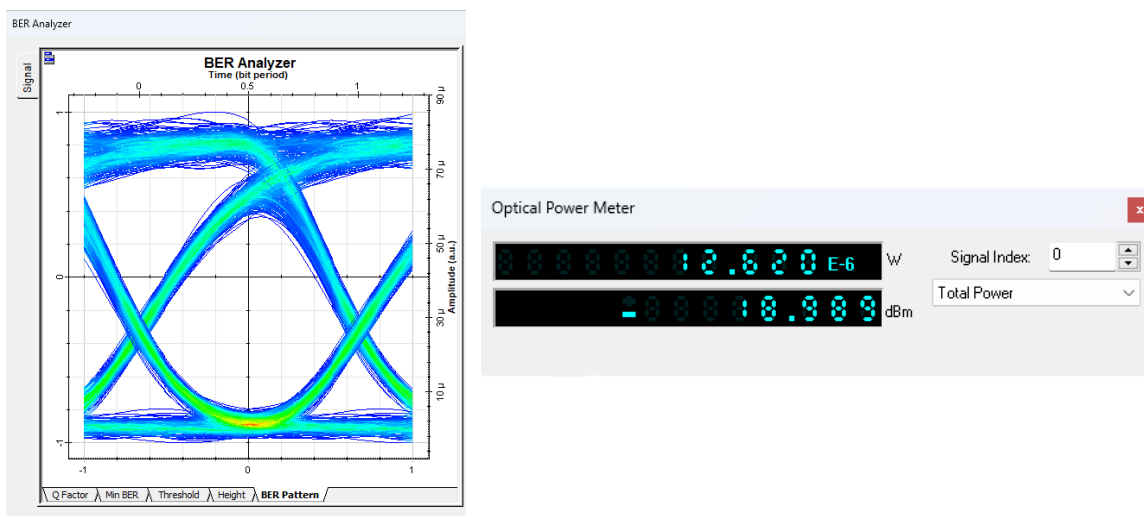


Fig. 23. Diagrama de ojo y potencia óptica recibida para distancia cercana en el enlace descendente.

Los resultados del factor Q y del BER en el enlace ascendente se muestran en la Fig. 24, en ella se observa un factor Q de 9,6 y el BER mínimo es  $4,1 \times 10^{-22}$ , valores que como se ha indicado anteriormente, demuestran un funcionamiento correcto.

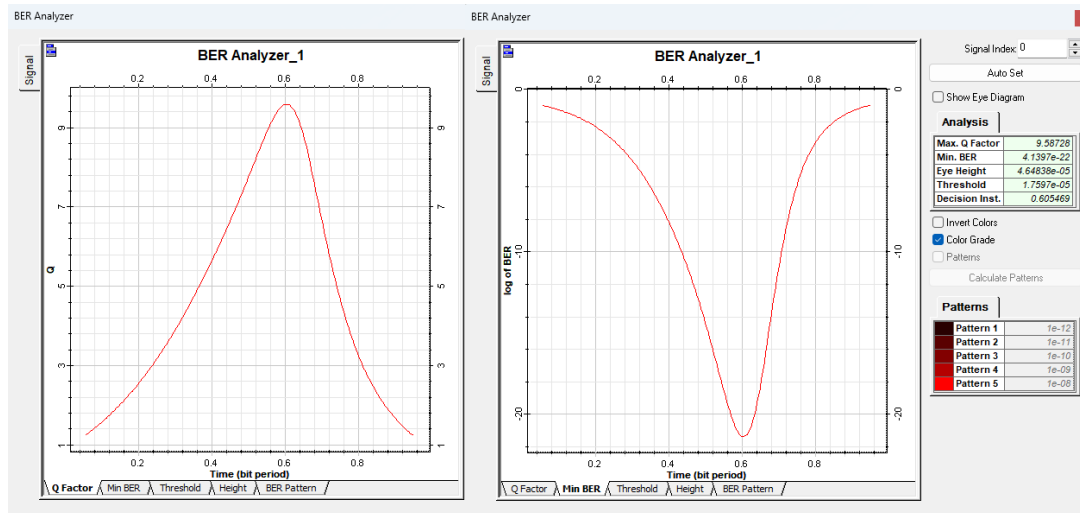


Fig. 24. Factor Q y BER mínimo para distancia más cercana en el enlace ascendente.

El diagrama de ojo y la potencia óptica recibida se muestra en la Fig. 25. La diferencia entre el valor de potencia medido y calculado es de -2,5 dB.

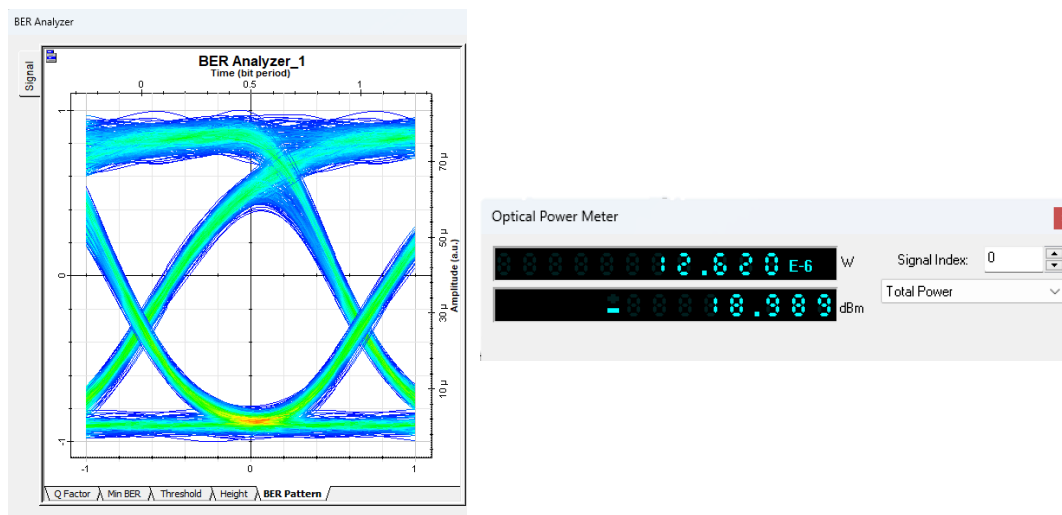


Fig. 25. Diagrama de ojo y potencia óptica recibida para distancia cercana en el enlace ascendente.

Los resultados del factor Q y del BER en el enlace descendente para la distancia más lejana se muestran en la Fig. 26, en ella se observa un factor Q de 7,3 y el BER mínimo es  $1,1 \times 10^{-13}$ , valores que como se ha indicado anteriormente, demuestran un funcionamiento correcto.

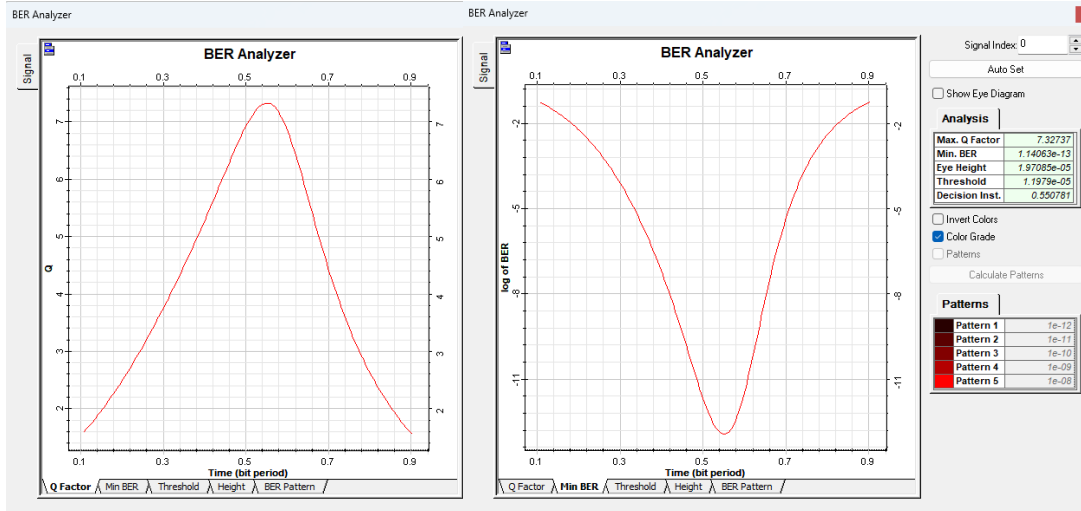


Fig. 26. Factor Q y BER mínimo para distancia más lejana en el enlace descendente.

El diagrama de ojo y la potencia óptica recibida se muestra en la Fig. 27. La diferencia entre el valor de potencia medido y calculado es de -0,3 dB.

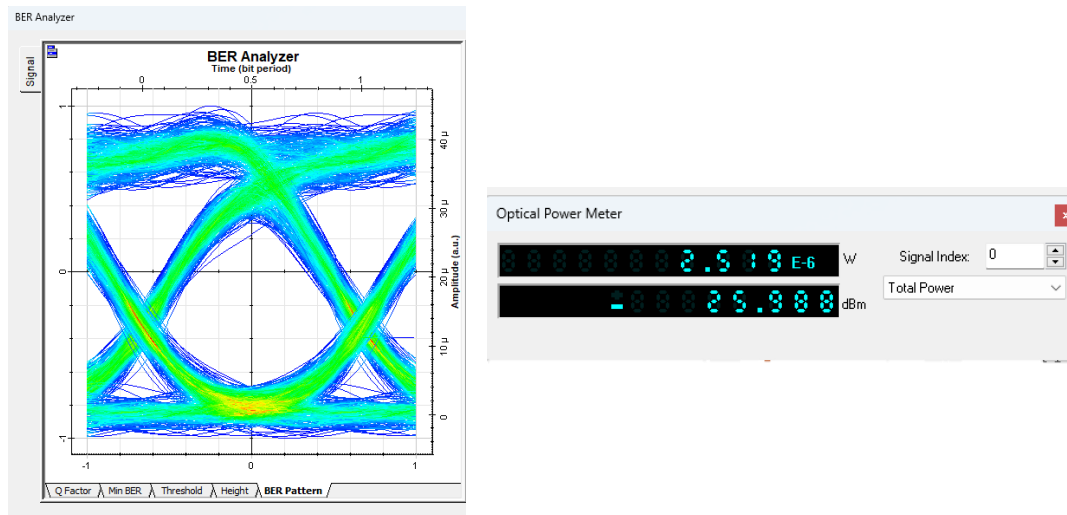


Fig. 27. Diagrama de ojo y potencia óptica recibida para distancia lejana en el enlace descendente.

Los resultados del factor Q y del BER en el enlace ascendente se muestran en la Fig. 28, en ella se observa un factor Q de 7,6 y el BER mínimo es  $1,2 \times 10^{-14}$ , valores que como se ha indicado anteriormente, demuestran un funcionamiento correcto.

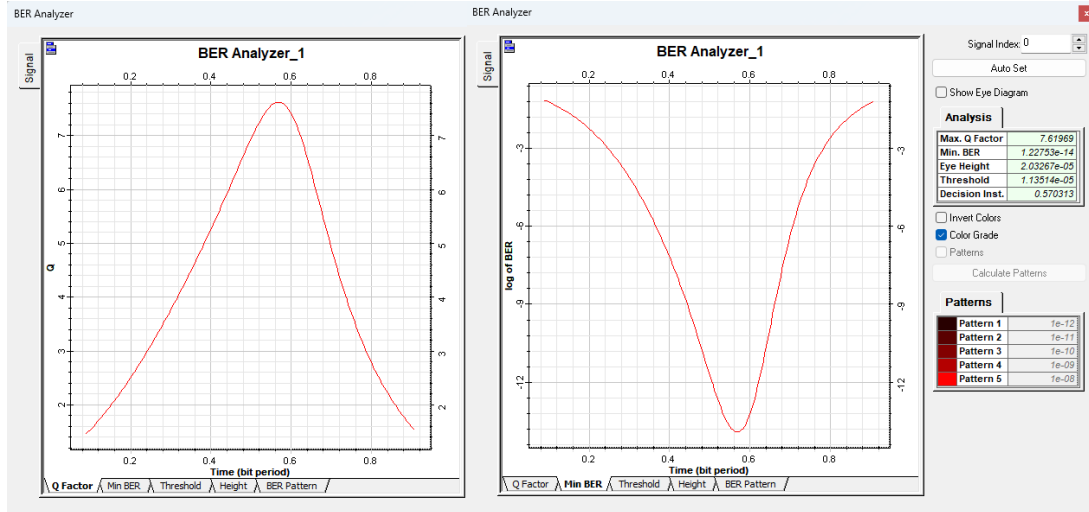


Fig. 28. Factor Q y BER mínimo para distancia más lejana en el enlace ascendente.

El diagrama de ojo y la potencia óptica recibida se muestra en la Fig. 29. La diferencia entre el valor de potencia medido y calculado es de -2,1 dB.

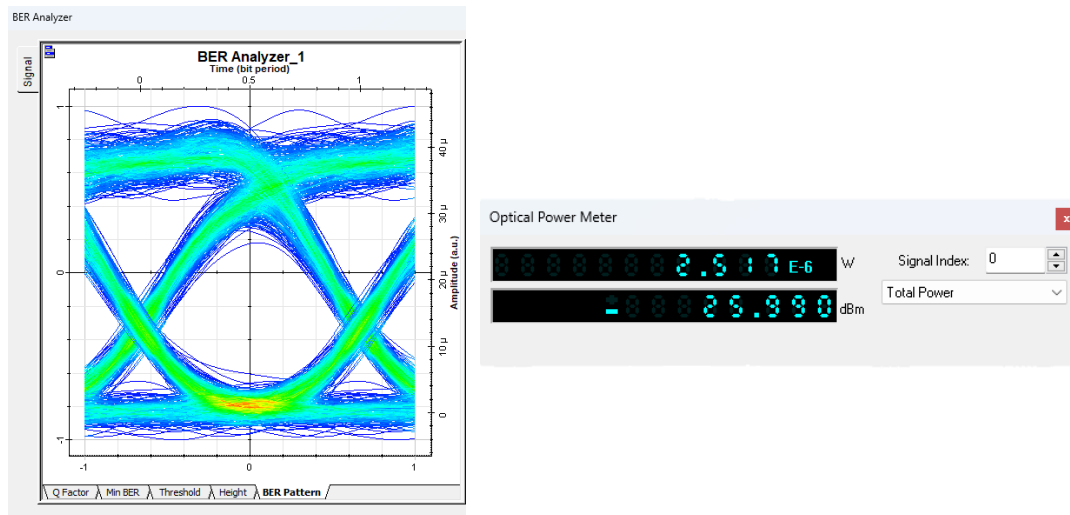


Fig. 29. Diagrama de ojo y potencia óptica recibida para distancia lejana en el enlace ascendente.

En la Tabla 8 se muestra el resumen de las simulaciones en cada escenario planteado.

Parámetro		Enlace		Ascendente	
		Descendente			
Longitud de onda (nm)		1577		1270	
Distancia (km)		5	20	5	20
Potencia (dBm)	Calculada	-21,05	-26,30	-21,50	-28,10
	Simulación	-18,989	-25,988	-18,989	-25,990
Factor Q		9,690	7,327	9,580	7,610
BER		$1,49 \times 10^{-22}$	$1,14 \times 10^{-13}$	$4,14 \times 10^{-22}$	$1,23 \times 10^{-14}$

Tabla 8: Resumen de los valores obtenidos en los escenarios planteados utilizando el estándar XGS-PON.

#### IV. CONCLUSIONES

- Una vez concluido el presente trabajo se determina que el estándar XGS-PON es el más óptimo en cuanto a distancias y cantidad de usuarios, ofreciendo escalabilidad de la red y brindando tasas binarias aceptables para todos los usuarios, tanto en el enlace ascendente como descendente.
- El estándar de mayor despliegue en el Ecuador es G-PON, lo cual permite reutilizar la infraestructura existente al iniciar la migración hacia un nuevo estándar, como XG-PON o XGS-PON. Esta oportunidad se presenta debido a la coexistencia de G-PON y XG-PON, o de G-PON y XGS-PON detallada en las recomendaciones de la ITU-T.
- El presupuesto para la migración de los equipos activos expuesto en las Tabla 5 y Tabla 6, nos indica que para la migración por abonado pasado se requiere de un valor de \$134,36 hacia el estándar XGS-PON y de \$ 94,66 hacia el estándar XG-PON, lo que representa un coste de inversión mayor para el estándar XGS-PON. Sin embargo, el costo-beneficio es mayor si se realiza la migración de la red G-PON hacia una red con las prestaciones y escalabilidad que ofrece el estándar XGS-PON.
- Las recomendaciones desarrolladas por la ITU-T detallan los parámetros necesarios para obtener una red funcional. Mediante los datos que brindan en las tablas de características para los estándares XGS-PON (G.9807), XG-PON (G.987), fibra óptica (G.652 y G.657) y

redes de acceso con fibra óptica (G.983) se logró simular los diferentes tipos de enlaces abordados en este estudio.

- El software de simulación escogido para desarrollar los escenarios fue Optisystem, el cual permitió obtener datos acerca del funcionamiento del enlace. Mediante las herramientas que ofrece se verificó que los parámetros establecidos en las recomendaciones ITU-T, estuvieran acordes con lo obtenido en las simulaciones, asegurando el rendimiento adecuado de la nueva red.
- En la simulación del estándar XGS-PON para el escenario con mayor atenuación que se muestran en la Tabla 4, se verificó que la potencia recibida sería de -25,99 dBm para el enlace ascendente y -25,99 dBm para el enlace descendente. Estos datos nos indican que el enlace es factible, debido a que la sensibilidad en el receptor para la clase N2 es de -28 dBm.
- La coexistencia de dos tecnologías en un mismo sistema, supone un ahorro de consumo energético, ya que se podría utilizar el estándar G-PON en los momentos en los que la demanda de ancho de banda sea menor y utilizar el estándar XGS-PON en horas de alto tráfico.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] L. E. Chalarca and L. H. Zimmermann Felchner, “HFC y FTTH en la era del ‘Gigabit,’” *Fiber Broadband Latam Chapter*, pp. 24–25, 2023.
- [2] J. Stanke, “Global broadband subscriber growth rebounds as fiber increases its share further in Q3 2023.” Accessed: Mar. 15, 2024. [Online]. Available: <https://www.point-topic.com/post/global-broadband-subscribers-q3-2023>
- [3] V. Contreras García, “Los 4 países de América Latina que más están creciendo en Internet de fibra óptica.” Accessed: Mar. 15, 2024. [Online]. Available: <https://dplnews.com/paises-de-america-latina-que-mas-estan-creciendo-en-internet-de-fibra-optica/>
- [4] FCGA, “FTTH council global alliance,” pp. 1–23, 2023. Accessed: Mar. 02, 2024. [Online]. Available: [fiberbroadband.org/about-latam/](http://fiberbroadband.org/about-latam/)
- [5] ARCOTEL, “Boletín estadístico,” pp. 16–19, 2022, Accessed: Mar. 15, 2024. [Online]. Available: [www.arcotel.gob.ec](http://www.arcotel.gob.ec)
- [6] R. Adisatya, Y. Natali, and C. Apriono, “Analysis of XG-PON Based FTTH Design for Downstream and Upstream Configurations,” *Proceedings of the International Conference on Electrical Engineering and Informatics*, vol. 2022-October, no. October, pp. 36–41, 2022, doi: 10.1109/IConEEI55709.2022.9972301.
- [7] B. J. Hamza *et al.*, “Performance enhancement of SCM/WDM-ROF-XGPoN system for bidirectional transmission with square root module,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 49487–49503, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3065285.
- [8] R. A. López Alban and D. A. Santillán Haro, “Estudio, diseño y simulación de una red NG-PON2 para analizar su rendimiento en el barrio Juan de Velasco,” Tesis, Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba, 2023.
- [9] B. A. Celi Izquierdo, “Análisis técnico comparativo de las redes De Acceso XGS-PON versus NG-PON2,” Tesis, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2022.
- [10] L. E. Conde Zhingre, P. A. Quezada Sarmiento, and M. L. Labanda Jaramillo, “Interconexión mediante tecnología GPON en una ciudad Inteligente: Caso de estudio Ciudad de Loja (Ecuador) Interconnection using GPON technology in an intelligent city: Case study Ciudad de Loja (Ecuador),” *Revista Espacios*, vol. 39, Loja, pp. 1–13, Sep. 30, 2018.
- [11] R. F. Syahrizal, Y. Natali, and C. Apriono, “Design and Analysis of an XGS-PON Technology for an Urban Area FTTH Network with Unidirectional and Bidirectional Transmission,” *2023 9th International Conference on Wireless and Telematics (ICWT)*, pp. 1–6, 2023, doi: 10.1109/icwt58823.2023.10335491.
- [12] ITU-T, “G.984.1 Gigabit-capable passive optical networks (GPON): General characteristics,” 2008.
- [13] ITU-T, “ITU-T Rec. G.987 (06/2012) 10-Gigabit-capable passive optical network (XG-PON) systems: Definitions, abbreviations and acronyms,” 2012.
- [14] ITU-T G 987.1, “ITU-T Rec. G.987.1 Corrigendum 1 (03/2020) 10-Gigabit-capable passive optical networks (XG-PON): General requirements Corrigendum 1,” vol. 1, no. 2016, 2020.
- [15] ITU-T, “ITU-T G.9807.1 (02/2023) 10-Gigabit-capable symmetric passive optical network (XGS-PON),” *Telecommunication Standardization sector of ITU*, vol. 1, 2023.
- [16] G 984, “ITU-T Rec. G.984.2 (08/2019) Gigabit-capable passive optical networks (GPON): Physical media dependent (PMD) layer specification,” 2019. [Online]. Available: <http://handle.itu.int/11.1002/1000/11>

- [17] G 9807, “ITU-T Rec. G.9807.2 Amendment 1 (11/2018) 10 Gigabit-capable passive optical networks (XG(S)-PON): Reach extension Amendment 1,” 2018. [Online]. Available: <http://handle.itu.int/11.1002/1000/11>
- [18] G 987, “ITU-T G.987.2 (2023) Amd. 1 (06/2023) - 10-Gigabit-capable passive optical networks (XG PON): Physical media dependent (PMD) layer specification,” 2023. [Online]. Available: <https://handle.itu.int/>
- [19] ITU-T, “ITU-T G.652 Characteristics of a single-mode optical fibre and cable,” 2016. [Online]. Available: <http://handle.itu.int/11.1002/1000/11>
- [20] ITU-T, “ITU-T Rec. G.652 (11/2009) Characteristics of a single-mode optical fibre and cable,” 2009.
- [21] ITU-T, “ITU-T G.657 Characteristics of a bending-loss insensitive single-mode optical fibre and cable,” 2016. [Online]. Available: <http://handle.itu.int/11.1002/1000/11>
- [22] MJADOM, “What is the Difference Between G.652 & G.655 and G.657 Single Mode Fiber.” Accessed: Apr. 19, 2024. [Online]. Available: <https://www.mjadom.com/blog/Difference-Between-G652-and-G655-and-G657-Single-Mode-Fiber.html>
- [23] J. E. Sani Domínguez, “Diseño, evaluación de una red FTTH utilizando optisystem y estrategia para la obtención de concesión que permita brindar servicios triples play,” Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, 2022.
- [24] I. Calvillo Mendoza, E. Ibarrola, and J. J. Unzilla, “Diseño de una red FTTH para un operador global de telecomunicaciones en el área de la CAPV,” TFM, Universidad del país vasco, Bilbao, 2017.
- [25] ITU-T G.983.1, “Sistemas de acceso óptico de banda ancha basados en redes ópticas pasivas G.983.1,” *ITU-T G-Series Recommendations*, 2005.
- [26] J. Litvik, I. Dolnak, and J. Dubovan, “Performance of High Order Modulation Formats in Coexistence of Gigabit (GPON) and Next-Generation Passive Optical Network (XG-PON),” *ICETA 2020 - 18th IEEE International Conference on Emerging eLearning Technologies and Applications, Proceedings*, pp. 401–404, 2020, doi: 10.1109/ICETA51985.2020.9379215.
- [27] J. C. Pinduisaca Quishpe, “Diseño de una red de acceso FTTH con tecnología XGS-PON para el ISP SKYLINK SYSTEM del cantón Chambo de la provincia de Chimborazo,” Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba, 2023.
- [28] UIT-T, “UIT-T O.201 Equipo de prueba del factor Q para evaluar la calidad de transmisión de los canales ópticos,” 2003.
- [29] Optiwave, “OptiSystem Overview,” 2023. Accessed: Mar. 16, 2024. [Online]. Available: <https://optiwave.com/optisystem-overview/>
- [30] Municipio de Loja and Dirección de Informática, “Diagnóstico General,” Loja, 2020. Accessed: Mar. 15, 2024. [Online]. Available: <https://www.loja.gob.ec/contenido/plan-de-desarrollo-y-ordenamiento-territorial>
- [31] S. V. Valarezo Jaramillo, M. Castillo, and L. Alvarado, “El verde urbano público: dotación, distribución y accesibilidad. Caso de estudio Loja - Ecuador,” *PENSUM*, vol. 8, no. 8, pp. 55–71, Jun. 2022, doi: 10.59047/2469.0724.v8.n8.34668.
- [32] CDR, “HUAWEI MA5800-X7 GPON OLT (H901GPHF 16-port GPON included).” Accessed: Jun. 11, 2024. [Online]. Available: <https://es.cdr.pl/p5779,huawei-ma5800-x7-gpon-olt-h901gphf-16-port-gpon-included.html>
- [33] ALEA, “ONT XG-PON Huawei EN8145X6.” Accessed: Jun. 11, 2024. [Online]. Available: <https://www.aleashop.es/ont-gpon-huawei-en8145x6.html>



- [34] Fiber mall, “XGPON1-ONU-C XG-PON1 ONU SFP + TX-2.5 / RX-9.95G TX-1270nm / RX-1577nm N1 / N2a SC DDM 0 ° C ~ 70 ° C Transceptores ópticos.” Accessed: Jun. 11, 2024. [Online]. Available: <https://www.fibermall.com/es/sale-433313-xg-pon1-ONU-sfp-n1-n2a.htm>
- [35] Fiber mall, “Transceptores ópticos XGPON1-OLT-SN1 XG-PON1 OLT SFP + TX-9.95G / RX-2.5G TX-1577nm / RX-1270nm N1 SC DDM.” Accessed: Jun. 11, 2024. [Online]. Available: <https://www.fibermall.com/es/sale-433233-xg-pon1-olt-sfp-n1.htm>
- [36] ALEA, “ONT XGS-PON Huawei EN8255X6s-8X.” Accessed: Jun. 11, 2024. [Online]. Available: <https://www.aleashop.es/ont-gpon-huawei-en8255x6s-8x.html>
- [37] Fiber mall, “XGSPON-ONU-C XGSPON ONU SFP + TX-9.95G / RX-9.95G TX-1270nm / RX-1577nm N1 / N2 SC DDM 0 ° C ~ 70 ° C Transceptores ópticos.” Accessed: Jun. 11, 2024. [Online]. Available: <https://www.fibermall.com/es/sale-433358-xgspon-ONU-sfp-n1-n2.htm>
- [38] Fiber mall, “Transceptores ópticos FiberMall XGSPON-OLT-SN2 XGSPON OLT SFP+ TX-9.95G/RX-9.95G, 2.488G Tx-1577nm/Rx-1270nm SN2 SC UPC DDM.” Accessed: Jun. 11, 2024. [Online]. Available: <https://www.fibermall.com/es/sale-459385-xgspon-olt-10g-sfp-n2.htm>