



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE TELECOMUNICACIONES**

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO DE INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES

**“Desarrollo y Evaluación de un Testbed para analizar la Tecnología XGS-PON  
en una Arquitectura de Red FTTH.”**



**AUTOR:** Brandon Stiveens Paucar Paguay  
**DIRECTOR:** MSc. Hernán Mauricio Dominguez Limaico  
Ibarra-Ecuador

**2026**



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

## BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

### AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

#### 1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
<b>CÉDULA DE IDENTIDAD:</b>	0402037261		
<b>APELLIDOS Y NOMBRES:</b>	Paucar Paguay Brandon Stiveens		
<b>DIRECCIÓN:</b>	Luis Felipe Borja & Alfredo Gómez Jaime 8-129		
<b>EMAIL:</b>	bspaucarp@utn.edu.ec		
<b>TELÉFONO FIJO:</b>	062225076	<b>TELÉFONO MÓVIL:</b>	0983152099

DATOS DE LA OBRA	
<b>TÍTULO:</b>	Desarrollo y Evaluación de un Testbed para analizar la Tecnología XGS-PON en una Arquitectura de Red FTTH.
<b>AUTOR (ES):</b>	Paucar Paguay Brandon Stiveens
<b>FECHA: DD/MM/AAAA</b>	25 de febrero de 2026
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
<b>PROGRAMA:</b>	<input checked="" type="checkbox"/> <b>PREGRADO</b> <input type="checkbox"/> <b>POSGRADO</b>
<b>TÍTULO POR EL QUE OPTA:</b>	Ingeniería en Telecomunicaciones.
<b>ASESOR /DIRECTOR:</b>	MSC. Mauricio Domínguez

## **2. CONSTANCIAS**

El autor (es) manifiesta (n) que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es (son) el (los) titular (es) de los derechos patrimoniales, por lo que asume (n) la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá (n) en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 25 días del mes de febrero de 2026.

### **EL AUTOR:**

Brandon Stiveens Paucar Paguay



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**

**CERTIFICACIÓN**

MAGISTER MAURICIO DOMÍNGUEZ, DIRECTOR DEL PRESENTE TRABAJO DE TITULACIÓN CERTIFICA:

Que el presente trabajo de Titulación DESARROLLO Y EVALUACIÓN DE UN TESTBED PARA ANALIZAR LA TECNOLOGÍA XGS-PON EN UNA ARQUITECTURA DE RED FTTH, ha sido desarrollado por el estudiante Paucar Paguay Brandon Stiveens bajo mi supervisión.

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad.

MSc. Mauricio Domínguez Limaico

**DIRECTOR**



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**

**DEDICATORIA**

Dedico este trabajo de titulación a mis padres, Fernando Paucar y Laura Paguay, quienes han sido mi mayor grande ejemplo de esfuerzo, perseverancia y compromiso. Comprometiéndome con ellos a que un día yo tomaría su lugar en este logro tan importante.

Gracias por su apoyo incondicional y por cada sacrificio realizado en mí incluso en los momentos más difíciles. Su guía, así como su paciencia y valores me han ayudado en mi crecimiento personal y profesional, haciendo posible la culminación de esta etapa tan trascendental de mi vida. Este logro es reflejo de su dedicación y amor con el que siempre me han acompañado. Todo lo que soy y lo que he alcanzado se lo debo a ustedes.

A mis hermanos muchas gracias por su compañía constante y ese apoyo sincero a lo largo de este camino, siendo un respaldo fundamental para afrontar cada desafío que se ha presentado.

Y de manera muy especial, a mi sobrina, quien con su llegada se convirtió en una fuente de motivación para seguir adelante y no rendirme, mostrando siempre esa alegría e inocencia que muestra lo bonito de la vida.

Este logro es para ustedes.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**

**AGRADECIMIENTO**

Agradezco a mi institución académica, la Universidad Técnica del Norte, a la Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas y de manera especial a la Carrera de Ingeniería en Telecomunicaciones, por brindarme la formación académica y la experiencia significativa en mi formación profesional, así como también en el desarrollo de mis conocimientos en el área de las telecomunicaciones.

Mi sincero agradecimiento al MSc. Hernán Mauricio Domínguez Limaico, director de este proyecto de investigación, por su orientación, conocimientos y las herramientas necesarias para desarrollar el presente trabajo de titulación. De igual manera por su disposición y valiosos aportes técnicos que permitieron fortalecer el contenido de esta tesis.

A los docentes de la carrera, quienes con su enseñanza y experiencia contribuyeron de manera significativa a mi crecimiento profesional y personal en el ámbito académico.

Finalmente, agradezco nuevamente a mi familia, y a todas las personas que me apoyaron directa e indirectamente en este proceso que me ayudó alcanzar esta meta académica.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**

**RESUMEN**

El presente trabajo de titulación se centra en el diseño y la implementación de un testbed orientado al análisis y desempeño de la tecnología XGS-PON en una arquitectura de red FTTH (Fiber To The Home). Esta investigación surge de la necesidad de evaluar soluciones que respondan de manera eficiente al crecimiento de ancho de banda y a los requerimientos actuales de las redes de acceso de nueva generación.

Las redes FTTH se han consolidado como una alternativa efectiva para la provisión de servicios de alta velocidad, principalmente por el uso de redes ópticas pasivas (PON), las cuales permiten la transmisión simultánea de información en sentido ascendente y descendente sin requerir elementos activos intermedios. En este contexto, la tecnología XGS-PON destaca por ofrecer velocidades simétricas de hasta 10 Gbps, lo que la convierte en una opción adecuada para soportar aplicaciones y servicios que demandan altos niveles de capacidad y calidad.

Se propone el desarrollo de un entorno de pruebas que permita modelar el comportamiento de una red FTTH basada en la recomendación ITU-T G.9807.1, fortaleciendo las capacidades de investigación y análisis de redes ópticas en la Universidad Técnica del Norte

Finalmente, el desarrollo del testbed contempla la construcción del marco teórico, el diseño de una topología de red, la implementación de escenarios mediante software especializado y la evaluación de los resultados obtenidos, aportando así una herramienta práctica para el estudio y comprensión de la tecnología XGS-PON en entornos FTTH.

**Palabras clave:** XGS-PON, FTTH (Fibra hasta el Hogar), Testbed experimental, Redes ópticas pasivas (PON), Demanda de ancho de banda, Desempeño de red, ITU-T G.9807.1, Simulación de redes, Redes de acceso de nueva generación, Evaluación de rendimiento.

## LISTA DE SIGLAS

**BER:** Tasa de error de bits.

**FTTH:** Fibra hasta el hogar.

**GPON:** Red óptica pasiva con capacidad en gigabits.

**ITU-T:** Unión Internacional de Telecomunicaciones.

**NG-PON2:** Red óptica pasiva de siguiente generación 2.

**OLT:** Terminal de línea óptica.

**ONT:** Terminal de red óptica.

**OSNR:** Relación señal-ruido óptica.

**PON:** Red óptica pasiva.

**SNR:** Relación señal-ruido.

**WDM:** Multiplexación por división de longitud de onda.

**XG-PON:** Red óptica pasiva con capacidad de 10 Gbps descendente.

**XGS-PON:** Red óptica pasiva simétrica con capacidad de 10 Gbps.

**TIR:** Total Internal Reflection (Reflexión Interna Total).

**NRZ:** Non-Return to Zero (Codificación de Línea).

**dB:** Decibel.

**dB/km:** Decibel por kilómetro (Atenuación).

**MHz/km:** Megahertz por kilómetro (Ancho de banda).

**n1, n2:** Índices de refracción del núcleo y del revestimiento.

**ORL:** Optical Return Loss (Pérdida de Retorno Óptica).

**S/R, R/S:** Puntos de referencia de subida/bajada en la ODN.

**Oiu, Oid, Oru, Ord:** Interfaces ópticas upstream y downstream entre ONU y ODN/OLT.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**

**ABSTRACT**

This graduation project focuses on the design and implementation of a testbed aimed at analyzing the performance of XGS-PON technology within an FTTH (Fiber To The Home) network architecture. This research arises from the need to evaluate solutions capable of efficiently addressing the growth in bandwidth demand and the current requirements of next-generation access networks.

FTTH networks have become an effective alternative for the provision of high-speed services, mainly due to the use of passive optical networks (PON), which enable simultaneous upstream and downstream data transmission without the need for active intermediate elements. In this context, XGS-PON technology stands out by offering symmetric transmission speeds of up to 10 Gbps, making it a suitable option for supporting applications and services that require high levels of capacity and quality.

This work proposes the development of a test environment that allows modeling the behavior of an FTTH network based on the ITU-T G.9807.1 recommendation, strengthening the research and analysis capabilities of optical access networks at the Universidad Técnica del Norte. Finally, the testbed development includes the establishment of a theoretical framework, the design of a network topology, the implementation of scenarios using specialized software, and the evaluation of the obtained results, providing a practical tool for the study and understanding of XGS-PON technology in FTTH environments.

**Keywords:** XGS-PON, FTTH (Fiber To The Home), Experimental Testbed, Passive Optical Networks (PON), Bandwidth Demand, Network Performance, ITU-T G.9807.1, Network Simulation, Next-Generation Access Networks, Performance Evaluation

## Índice de Contenidos

Capítulo I: Antecedentes.....	14
1.1. Tema .....	14
1.2. Problema .....	14
1.3. Objetivos.....	16
1.3.1. Objetivo General.....	16
1.3.2. Objetivos Específicos.....	16
1.4. Alcance .....	17
1.5. Justificación .....	19
Capítulo II: Estado del Arte .....	22
2.1. Fundamentos teóricos de fibra óptica .....	22
2.1.1 Definición de fibra óptica .....	22
2.1.2. Principios de transmisión de la luz .....	23
2.1.3. Tipos de Fibra Óptica.....	25
2.1.4. Estructura de la Fibra Óptica .....	26
2.1.5. Tipos de Pérdidas de la Fibra Óptica .....	28
2.1.6. Ventanas de Transmisión en la Fibra Óptica .....	30
2.2. Redes PON.....	31
2.2.1. Tipos de Redes PON.....	32
2.2.2. Comparativa de Redes PON .....	36
2.2.3. Ventajas de las Redes PON.....	37

	12
2.3. Tecnología XGS-PON .....	39
2.3.1. Definición de Redes XGS-PON.....	39
2.3.2. Arquitectura de XGS-PON .....	40
2.3.3. Requisitos de Capa Física .....	41
2.3.4. Requisitos de la Red Óptica para XGS-PON.....	46
2.3.5. Funcionamiento de XGS-PON .....	49
2.3.6. Ventajas y Desventajas de XGS-PON .....	51
2.3.7. Retos y Limitaciones.....	52
2.3.8. Impacto con otras Tecnologías Coexistentes .....	52
Capítulo III: Diseño del Sistema.....	55
3.1. Arquitectura FTTH y XGS-PON: Fundamentos para el análisis experimental	55
3.1.1. Componentes Claves de la Arquitectura FTTH/XGS-PON .....	56
3.1.2. Equipos de Monitoreo para Validación Experimental en Redes XGS-PON	59
.....	59
3.2. Diseño de Red XGS-PON en un entorno de Simulación.....	60
3.2.1. Parámetros técnicos estándar y su base Normativa .....	61
3.3. Software de Simulación (OptiSystem).....	62
3.3.1. Características técnicas relevantes .....	62
3.4. Parámetros Operativos .....	63
3.4.1. Longitudes de Onda .....	64
3.4.2. Relación de División.....	64
3.4.3. Distancia Máxima .....	65

3.5. Diseño y Configuración de la Topología del Testbed .....	65
3.5.1. Arquitectura de Red FTTH Punto a Multipunto .....	66
3.5.2. Configuración en el Simulador OptiSystem .....	69
3.6 Escenarios de Prueba (Testbed).....	73
3.6.1 Escenario 1: Distancia máxima.....	73
3.6.2 Escenario 2: División de señal.....	76
3.6.3 Escenario 3: Coexistencia tecnológica.....	79
3.7. Implementación del Testbed.....	81
3.7.1 Escenario 1: Distancia máxima.....	81
3.7.2 Escenario 2: División de señal.....	87
3.7.3 Escenario 3: Coexistencia tecnológica.....	90
Capítulo IV: Pruebas de Funcionamiento .....	95
4.1.    Métricas de evaluación de los escenarios .....	95
4.1.1. Potencia de la señal.....	95
4.1.2. Relación señal-ruido óptica.....	97
4.1.3. Tasa de error de bits.....	98
4.1.4. Espectro de la señal óptica.....	100
4.2.    Monitoreo de métricas de desempeño .....	101
4.2.1. Escenario 1: Distancia Máxima .....	101
4.2.2 Escenario 2: División de Señal .....	118
4.2.3 Escenario 3: Coexistencia tecnológica.....	124

4.3. Comparación con los Estándares de la UIT-T .....	132
4.3.1. Escenario 1: Distancia Máxima .....	132
4.3.2. Escenario 2: División de señal.....	133
4.3.3. Escenario 3: Coexistencia tecnológica.....	135
Conclusiones y Recomendaciones .....	138
Conclusiones .....	138
Recomendaciones .....	140
Bibliografía .....	141
Anexos .....	145

## Índice de Tablas

<b>Tabla 1</b> Comparativa de características de tipos de redes PON.....	37
<b>Tabla 2</b> Asignación de Longitudes de Onda para XGS-PON.....	44
<b>Tabla 3</b> Clases de ODN para XGS-PON .....	45
<b>Tabla 4</b> Niveles de potencia de XGS-PON downstream .....	48
<b>Tabla 5</b> Niveles de potencia de XGS-PON para upstream. ....	49
<b>Tabla 6</b> Componentes de simulación. Bloque OLT y procesamiento de señal.....	71
<b>Tabla 7</b> Componentes de simulación. Bloque ODN y elementos intermedios.....	72
<b>Tabla 8</b> <i>Componentes de simulación. Bloque ONT y procesamiento final</i> .....	73
<b>Tabla 9</b> Valores de referencia para potencia óptica en PON .....	96
<b>Tabla 10</b> Valores de referencia para OSNR.....	97
<b>Tabla 11</b> Valores de referencia para BER.....	98
<b>Tabla 12</b> Criterios de evaluación espectral .....	100
<b>Tabla 13</b> Registro de niveles de potencia en la red del escenario 1 .....	107
<b>Tabla 14</b> Tabla de pérdidas totales del enlace de fibra óptica del usuario más lejano .....	108
<b>Tabla 15</b> Resultado del presupuesto de potencia en la ONT del usuario más lejano	109
<b>Tabla 16</b> Tabla de pérdidas totales del enlace de fibra óptica del usuario cercano ..	109
<b>Tabla 17</b> Resultado del presupuesto de potencia en la ONT del usuario cercano ....	110
<b>Tabla 18</b> Resultados de OSNR del primer escenario.....	113
<b>Tabla 19</b> Resultados del BER registrado en el primer escenario.....	118
<b>Tabla 20</b> Registro de niveles de potencia en la red del escenario 2.....	120
<b>Tabla 21</b> Tabla de pérdidas totales del enlace de fibra óptica del usuario lejano .....	120
<b>Tabla 22</b> Resultado del presupuesto de potencia en la ONT del usuario lejano.....	121
<b>Tabla 23</b> Resultado del presupuesto de potencia en la ONT del usuario cercano ....	122

<b>Tabla 24</b> Resultado del presupuesto de potencia en la ONT del usuario cercano ....	123
<b>Tabla 25</b> Resultados de OSNR del primer escenario .....	124
<b>Tabla 26</b> Resultados del BER registrado en el segundo escenario .....	124
<b>Tabla 27</b> Registro de niveles de potencia en la red del tercer escenario.....	126
<b>Tabla 28</b> Tabla de pérdidas totales del enlace de fibra óptica del usuario cercano ..	127
<b>Tabla 29</b> Resultado del presupuesto de potencia en la ONT del usuario cercano ....	128
<b>Tabla 30</b> Tabla de pérdidas totales del enlace de fibra óptica del usuario más lejano .....	128
<b>Tabla 31</b> Resultado del presupuesto de potencia en la ONT del usuario más lejano	129
<b>Tabla 32</b> Registro del espectro de la señal del tercer escenario .....	131
<b>Tabla 33</b> Métricas de desempeño del sistema XGS-PON en el primer escenario ....	132
<b>Tabla 34</b> Métricas de desempeño del sistema XGS-PON en el segundo escenario .	134
<b>Tabla 35</b> Métricas de desempeño del sistema XGS-PON en el tercer escenario.....	136
<b>Tabla 36</b> Requisitos mínimos y recomendados de instalación del Optisystem .....	146

## Índice de Figuras

<b>Figura 1</b> Ventanas de transmisión de la fibra óptica.....	31
<b>Figura 2</b> Arquitectura de red para XGS-PON.....	41
<b>Figura 3</b> Configuración física genérica de la ODN .....	43
<b>Figura 4</b> Arquitectura punto a multipunto en una red FTTH XGS-PON .....	67
<b>Figura 5</b> Comparación entre transmisión WDM y TDMA en redes ópticas pasivas .	68
<b>Figura 6</b> Diseño de coexistencia XGS-PON con G-PON con longitud de onda básica. .....	69
<b>Figura 7</b> Entorno gráfico de simulación de OptiSystem v22.0.....	70
<b>Figura 8</b> Componentes utilizados en la simulación en Optisystem v22.0 .....	70
<b>Figura 9</b> Diagrama esquemático en OptiSystem del primer escenario .....	75
<b>Figura 10</b> Diagrama esquemático en OptiSystem del segundo escenario .....	78
<b>Figura 11</b> Diagrama esquemático en OptiSystem del tercer escenario .....	80
<b>Figura 12</b> Parámetros de configuración del ambiente de simulación XGPON .....	81
<b>Figura 13</b> Parámetros de configuración del transmisor WDM.....	82
<b>Figura 14</b> Parámetros de configuración del amplificador óptico.....	83
<b>Figura 15</b> Parámetros de configuración de la fibra óptica .....	84
<b>Figura 16</b> Esquema y parámetros de los elementos de la red de distribución óptica .	85
<b>Figura 17</b> Esquema y parámetros de los elementos de la red de acceso óptica .....	86
<b>Figura 18</b> Parámetros de configuración del receptor óptico .....	87
<b>Figura 19</b> Arreglo de amplificadores del segundo escenario.....	88
<b>Figura 20</b> Parámetros de configuración del primer amplificador .....	89
<b>Figura 21</b> Parámetros de configuración del primer amplificador .....	89
<b>Figura 22</b> Parámetros de configuración del splitter .....	90
<b>Figura 23</b> Parámetros de configuración del transmisor XG-PON .....	91

<b>Figura 24</b> Parámetros de configuración del transmisor XGS-PON .....	92
<b>Figura 25</b> Parámetros de configuración del transmisor XG-PON .....	93
<b>Figura 26</b> Parámetros de configuración de la fibra óptica para XG-PON y XGS-PON .....	93
<b>Figura 27</b> Algoritmo de medición de potencia óptica.....	96
<b>Figura 28</b> Algoritmo de medición de OSNR .....	98
<b>Figura 29</b> Algoritmo de medición del BER .....	99
<b>Figura 30</b> Algoritmo de medición del espectro de la señal óptica.....	101
<b>Figura 31</b> Puntos de medición de potencia óptica en el enlace del primer escenario.	102
<b>Figura 32</b> Resultado de simulación sin presencia de errores en Optisystem .....	103
<b>Figura 33</b> Medición de los niveles de potencia óptica.....	104
<b>Figura 34</b> Potencia inicial en el transmisor WDM .....	104
<b>Figura 35</b> Potencia a la salida del amplificador EDFA .....	105
<b>Figura 36</b> Potencia al final del enlace de 40 km .....	105
<b>Figura 37</b> Potencia en salidas del splitter 1x4.....	106
<b>Figura 38</b> Medición de potencia de acuerdo con la distancia de los usuarios en la red .....	107
<b>Figura 39</b> Puntos de medición OSNR.....	111
<b>Figura 40</b> Información del Optical Spectrum Analyzer.....	112
<b>Figura 41</b> Parámetros OSNR .....	113
<b>Figura 42</b> Puntos de medición BER.....	114
<b>Figura 43</b> Información del BER Analyzer.....	115
<b>Figura 44</b> Parámetros BER .....	117
<b>Figura 45</b> Puntos de medición de potencia óptica en el enlace del segundo escenario .....	119

<b>Figura 46</b> Puntos de medición de potencia óptica en el enlace del tercer escenario	125
<b>Figura 47</b> Puntos de medición del espectro de la señal optica.....	130
<b>Figura 48</b> Analizador de espectros de coexistencia tecnológica.....	131
<b>Figura 49</b> Página web de descarga e inicio de sesión del software .....	145
<b>Figura 50</b> Asistente de instalación del Optisystem.....	146
<b>Figura 51</b> Interfaz de Optisystem.....	147

## Capítulo I: Antecedentes

### 1.1. Tema

Desarrollo y Evaluación de un Testbed para analizar la Tecnología XGS-PON en una Arquitectura de Red FTTH.

### 1.2. Problema

El diseño y optimización de redes FTTH enfrentan desafíos cruciales en la actualidad, marcados por la creciente demanda de ancho de banda, la evolución tecnológica y la necesidad de una infraestructura eficiente. Según (Vega, 2018) las redes FTTH (Fiber To The Home) son la solución más efectiva para proporcionar un mayor ancho de banda entre la red de la oficina central y su llegada hacia el hogar, siendo un factor que impacta directamente en la eficacia de este tipo de red.

Las redes FTTH se despliegan como una solución económica, debido a que se tratan de una red óptica pasiva (PON = Passive Optical Network), lo cual se refiere a la ausencia de alimentación de la fibra y de los componentes divisores y combinadores, siendo un enfoque primario de las redes FTTH ya que se emplean para transmitir señales de manera simultánea de forma ascendente como descendente, desde y hasta los puntos finales de la estructura de la red (VIAVI Solutions, 2022).

De acuerdo con (Jiménez, 2019) las redes FTTH juegan un papel fundamental para ayudar a los operadores de redes de acceso a satisfacer las demandas cada vez mayores de ancho de banda de los usuarios finales. Por lo tanto, la tecnología XGS-PON (10 Gigabit Symmetric Passive Optical Network) representa un avance significativo en las redes de acceso de fibra óptica, proporcionando velocidades de conexión ultrarrápidas y mayor capacidad de ancho de banda (Bonilla, 2022). Esta tecnología ha ganado atención en el ámbito de las telecomunicaciones al ofrecer velocidades simétricas de gigabit por segundo tanto para

descargas como para cargas, abordando así la creciente demanda de servicios de alta velocidad en entornos residenciales y empresariales (Satoshi YOSHIMA, 2019).

La Carrera de Ingeniería de Telecomunicaciones de la Universidad Técnica del Norte actualmente dispone de una base para el estudio de redes ópticas a través de un laboratorio de fibra, donde se llevan a cabo prácticas aisladas y puntuales sobre conexiones ópticas. La finalidad de este proyecto de investigación es mejorar estas capacidades mediante la implementación de experimentos en un entorno controlado, de modo que esto será alcanzado mediante el desarrollo de simulaciones que analicen el comportamiento del diseño de redes de acceso FTTH utilizando la recomendación ITU-T G.9807.1 para redes XGS-PON. Para modelar y optimizar eficazmente las redes de arquitectura FTTH, se requiere un modelo de red XGS-PON realista debido a la complejidad inherente de estos sistemas. Un modelo preciso puede evaluar el impacto de factores como la atenuación, la dispersión y los fenómenos no lineales en el rendimiento de la red (Ibeas, 2017). Esto facilita determinar configuraciones óptimas, predecir comportamiento en situaciones específicas y optimizar la infraestructura para satisfacer las necesidades de conectividad actuales y futuras, facilitando futuras aplicaciones prácticas en la carrera de ingeniería en telecomunicaciones de la Universidad Técnico Norte.

Los desafíos modernos en el diseño de redes de acceso FTTH con tecnología XGS-PON, hacen hincapié en la importancia de abordar la interferencia, la eficiencia energética y la adaptabilidad a la calidad de la señal. Además, subraya la necesidad de modelos realistas para una simulación precisa que oriente la evaluación y optimización de este modelo de redes cruciales en la era actual (Celleri, 2015).

## 1.3. Objetivos

### 1.3.1. *Objetivo General*

Implementar un testbed que permita el estudio de la tecnología XGS-PON a través de la recomendación ITU-T G.9807.1 mediante la simulación de una arquitectura de red FTTH.

### 1.3.2. *Objetivos Específicos*

- Elaborar una fundamentación teórica sobre la tecnología XGS-PON, abordando sus principios de funcionamiento, estándares, ventajas y aplicaciones en redes FTTH, con el objetivo de proporcionar una base conceptual sólida para la implementación del testbed.
- Diseñar una topología de red en un ambiente controlado (testbed) que considere los parámetros ópticos, así como características específicas de las redes FTTH con tecnología XGS-PON, para maximizar la eficiencia de la transmisión y minimizar las pérdidas de señal.
- Implementar el testbed a través de un software de diseño de redes, asegurando una configuración eficiente y precisa para la evaluación de la tecnología XGS-PON en el contexto de redes FTTH.
- Evaluar los resultados obtenidos a través de pruebas de funcionamiento que validan la eficacia y utilidad del testbed, analizando el desempeño de la tecnología XGS-PON en entornos de red FTTH.

#### 1.4. Alcance

La propuesta de trabajo de grado se encuentra enfocada en las redes FTTH y su rol crítico fundamental para la entrega de conectividad de alta velocidad y su relevancia en el panorama actual de las redes de comunicaciones, definiendo los requerimientos y procesos necesarios para la optimización de este tipo de redes a través de la implementación de la tecnología XGS-PON (10 Gigabit Symmetric Passive Optical Network).

Por consiguiente, se recopilará información bibliográfica necesaria referente a las redes FTTH (Fiber To The Home) y los desafíos actuales que presenta el desarrollo de este tipo de red, así como también se adquieren los conocimientos teóricos necesarios en base a las características específicas de la tecnología XGS-PON de acuerdo con las recomendaciones ITU-T G.9807.1 e ITU-T G 987.3, considerando el impacto de otras tecnologías coexistentes y otras características específicas dentro de las redes FTTH.

La siguiente fase se centrará en el desarrollo de un entorno de pruebas en un entorno controlado (testbed), con especial énfasis en la tecnología XGS-PON. Para resolver problemas específicos como el aumento del rendimiento, la calidad de la señal y el rendimiento de la red.

La propuesta de investigación tecnológica se centrará en el modelado y optimización de redes FTTH mediante software de diseño de redes, analizando y comparando diferentes herramientas, destacando las ventajas y oportunidades que ofrecen en términos de flexibilidad, disponibilidad y adaptabilidad a escenarios específicos de redes ópticas, para elegir la opción más adecuada. Este enfoque no solo permitirá una implementación eficiente del testbed, sino que también contribuirá en el ámbito académico y de investigación, interesando a su vez como enfoque de estudio práctico para los estudiantes de la carrera de Ingeniería en Telecomunicaciones de la Universidad Técnica del Norte.

A continuación, el estudio se centra en la construcción de un modelo realista de red a través de la metodología planteada en la figura 1. Este modelo captura con precisión los

aspectos técnicos esenciales para garantizar un despliegue efectivo de la tecnología XGS-PON en una red FTTH asegurando que la realización del testbed refleje de manera fiel las condiciones del entorno, mejorando la conectividad y el acceso a servicios de alta velocidad.

Finalmente, el proyecto establecerá una base sólida para su realización, definiendo claramente el marco teórico y práctico. Este enfoque permitirá obtener los resultados necesarios que requiere la investigación, con la finalidad que se pueda valorar la interacción de la tecnología XGS-PON con la estructuración de red FTTH, y como esto afecta la calidad y eficiencia de la red en diferentes condiciones. Por lo cual se estructurará una guía clara para abordar los desafíos particulares asociados con las redes FTTH, garantizando que la investigación sea específica, relevante y contributiva al campo de la Carrera de Ingeniería en Telecomunicaciones.

## 1.5. Justificación

El presente proyecto surge de acuerdo con la creciente de tecnologías que pretender brindar una experiencia de banda ultra ancha, para la conexión de usuarios domésticos. Esto de acuerdo con los nuevos desafíos que enfrentan las redes FTTH con la aparición de nuevos tipos de servicios robustos de transmisión de datos como video 4K / 8K, realidad aumentada (AR), realidad virtual (VR) y hogar inteligente, entre muchos otros (Lindes, 2017). La implementación de un modelo para redes de tipo FTTH, pretende enfocarse como una alternativa de optimización para la eficiencia y calidad de la red, por lo tanto, este proyecto se sustenta bajo la interacción de la fibra óptica la cual es el núcleo de las redes en la actualidad, debido a que es uno de los medios de transmisión más populares actualmente debido a su estabilidad, baja latencia y escalabilidad (Jiménez, 2019).

Esta tecnología utiliza el medio de transmisión de fibra óptica desde el punto central de servicios de internet hasta el local residencial o usuario final, ofreciendo el servicio de red de alta velocidad ininterrumpidamente (FTTH - Guía Rápida, 2020). FTTH es un modelo de tecnología que soluciona el acceso de fibra de manera definitiva para cada usuario suscriptor del servicio de internet, por lo cual a través de esta investigación se propone un enfoque de implementación de ruta desde la OLT hacia el terminal final ONT/ONU que va en las instalaciones del usuario, con el cual se pueda efectivizar la calidad y eficiencia de señal dentro de la red (Ruiz, 2021).

De acuerdo con (Bonilla, 2022) las tecnologías de red FTTH se proyecta como una red que seguirá creciendo su escalabilidad en el futuro, adaptando o migrando nuevas tecnologías o mejoras que se van desarrollando con el paso del tiempo. Actualmente son las redes pasivas ópticas punto a multipunto PON (Passive Optical Network) de siguiente generación, la cual extiende el ancho de banda de manera ilimitada, evitando cualquier tipo de cuello de congestión del servicio por incremento de demanda (Castañeda, 2023). Por lo cual en este proyecto de

investigación se implementa la tecnología de XGS-PON (10 Gigabit Symmetric Passive Optical Network) en un modelo de red FTTH.

Sin embargo, la adaptabilidad a la calidad de la señal es crucial para garantizar una experiencia del usuario sin interrupciones. Por lo cual la alteración de factores como la variabilidad en la longitud de onda, la dispersión y las pérdidas de inserción pueden afectar la calidad de la señal, requiriendo técnicas avanzadas de compensación y corrección (Pérez, 2021).

Esta investigación tiene como propósito aportar al fortalecimiento del conocimiento académico en el diseño eficiente de redes FTTH, incorporando un enfoque práctico mediante la implementación de un banco de pruebas que permita analizar el comportamiento de este tipo de redes en un entorno controlado. A través de este enfoque, se busca evaluar la recomendación ITU-T G.9807.1 aplicada a redes XGS-PON, facilitando su comprensión desde una perspectiva técnica y experimental.

El desarrollo de este trabajo brinda a los estudiantes la posibilidad de trabajar con escenarios simulados que integran las etapas de planificación, implementación y evaluación de redes FTTH con tecnología XGS-PON. De esta manera, se promueve una comprensión más clara de los desafíos reales que enfrenta la industria de las telecomunicaciones, al mismo tiempo que se contribuye a mejorar los criterios técnicos asociados a la conectividad y al acceso a servicios de alta velocidad para los usuarios finales.

La selección de la tecnología XGS-PON para el diseño y la simulación de una red FTTH se fundamenta en su capacidad para ofrecer un desempeño eficiente en la transmisión de datos de banda ancha. Esta tecnología permite alcanzar velocidades de transmisión simétricas de hasta 10 Gbps, lo que la posiciona como una alternativa adecuada frente a las crecientes demandas de conectividad de alta velocidad presentes en la actualidad (Zurita, 2019).

Asimismo, la implementación de la tecnología XGS-PON en la presente investigación se justifica por su potencial para optimizar el rendimiento general de la red, mejorar la eficiencia del sistema y garantizar una mayor calidad en los servicios de comunicación. Estos aspectos resultan fundamentales para el diseño de redes FTTH modernas, aportando al proceso de evolución continua de las infraestructuras de telecomunicaciones.

## Capítulo II: Estado del Arte

En este capítulo se explorarán los conocimientos esenciales para fundamentar el estudio sobre la tecnología XGS-PON, sus principios, características y funcionamiento, basados en las recomendaciones ITU-T G.9807.1 e ITU-T G.987.3. Se analizarán los conceptos fundamentales de las telecomunicaciones y la base teórica de las redes FTTH. Se profundizará en el análisis de XGS-PON, incluyendo sus componentes principales, arquitectura de red, y requisitos de capa física. Además, se considerarán aspectos de propagación, rendimiento y eficiencia dentro de las redes FTTH, así como la coexistencia con otras tecnologías como GPON y NG-PON2.

Este capítulo proporcionará una comprensión detallada y estructurada de los elementos técnicos y operativos necesarios para el desarrollo de un testbed eficaz que permita simular y estudiar la tecnología XGS-PON.

### 2.1. Fundamentos teóricos de fibra óptica

Este capítulo examina los fundamentos teóricos de la fibra óptica, abarcando su definición, los principios básicos de transmisión de la luz, y la comparación con otros medios de transmisión. También se describen los distintos tipos de fibra óptica, su estructura, las ventajas y desventajas, así como sus propiedades y características técnicas.

#### 2.1.1 Definición de fibra óptica

La fibra óptica es un filamento muy fino de plástico o vidrio, a través del cual la luz puede propagarse mediante sucesivas reflexiones internas totales. Este medio de transmisión permite transportar señales ópticas y energía luminosa, funcionando como el equivalente óptico de un cable coaxial o un par conductor (Grazzini, 2020).

En el contexto de la fibra óptica, la transmisión de la luz se explica, en primer lugar, porque el núcleo de la fibra posee un índice de refracción mayor que el del revestimiento que lo rodea, debido a esta diferencia, la luz no se dispersa hacia el exterior, sino que permanece

confinada dentro del núcleo gracias al fenómeno conocido como reflexión interna total. Como consecuencia, la señal luminosa puede desplazarse a lo largo de grandes distancias sin pérdidas significativas, lo que conlleva a que la fibra óptica se considere un medio altamente eficiente y confiable para la transmisión de datos. (Grazzini, 2020).

### ***2.1.2. Principios de transmisión de la luz***

La transmisión de luz a través de la fibra óptica se fundamenta en varios principios físicos que permiten el transporte eficiente de señales ópticas a grandes distancias. Estos principios son cruciales para entender el funcionamiento interno de las fibras ópticas y el comportamiento de la luz dentro de ellas.

La luz, al propagarse a través del núcleo de la fibra óptica, se ve influenciada por fenómenos como la reflexión interna total y la refracción, los cuales son esenciales para mantener la señal confinada en el núcleo de la fibra. Estos fenómenos se explican mediante leyes ópticas fundamentales, como la Ley de Snell, y conceptos como el índice de refracción.

Además, el rendimiento de la transmisión de datos está relacionado con el ancho de banda disponible, lo que determina la cantidad de información que puede ser transmitida por la fibra.

#### **2.1.2.1. Reflexión Interna Total (TIR)**

De acuerdo con (Ellingson, 2020) la reflexión interna total es un fenómeno óptico fundamental que permite la transmisión eficiente de luz a lo largo de una fibra óptica. Este proceso ocurre cuando un rayo de luz se desplaza dentro del núcleo de la fibra, un medio con un índice de refracción más alto, e incide en el límite con el revestimiento, un medio con un índice de refracción más bajo.

Si el ángulo de incidencia del rayo de luz es mayor que el ángulo crítico, determinado por la Ley de Snell, la luz no atraviesa el límite entre los dos medios, sino que se refleja completamente de vuelta al núcleo.

### 2.1.2.2. Ley de Snell

La Ley de Snell describe cómo la luz se refracta o cambia de dirección cuando pasa de un medio con un índice de refracción a otro con un índice de refracción diferente (Ellingson, 2020). La ley establece una relación matemática (Ec. 1) entre el ángulo de incidencia ( $\theta_1$ ) y el ángulo de refracción ( $\theta_2$ ), y los índices de refracción de los dos medios ( $n_1$  &  $n_2$ ).

$$n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin \theta_2 \quad (\text{Ec. 1})$$

Dentro del marco de la fibra óptica, esta ley ayuda a determinar el ángulo crítico necesario para la reflexión interna total, permitiendo que la luz se confine dentro del núcleo de la fibra y se transmita eficientemente a largas distancias.

### 2.1.2.3. Índices de Refracción

El índice de refracción es una medida que describe cómo la luz se propaga a través de un material. Se define matemáticamente (Ec. 2), como la razón entre la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad de la luz en el material específico (Álvarez Ramos et al., 2017).

$$n = \frac{c}{v} \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde:

- $n$  es el índice de refracción del material
- $c$  es la velocidad de la luz en el vacío (aproximadamente  $3 \times 10^8$  m/s)
- $v$  es la velocidad de la luz en el material

Según (Álvarez Ramos et al., 2017) en la fibra óptica hay dos índices de refracción importantes: el del núcleo ( $n_1$ ) y el del revestimiento ( $n_2$ ). Para que ocurra la reflexión interna total, el índice de refracción del núcleo debe ser mayor que el del revestimiento ( $n_1 > n_2$ ). Esta diferencia permite que la luz se refleje internamente y se mantenga confinada dentro del núcleo de la fibra, asegurando una transmisión eficiente de la señal.

#### **2.1.2.4. Ancho de Banda**

El ancho de banda en una fibra óptica se refiere al rango de frecuencias que pueden ser transmitidas a través de la fibra. Este parámetro es crucial, ya que determina la capacidad máxima del canal para transmitir información. Cuanto mayor sea el ancho de banda, mayor será la cantidad de datos que pueden ser enviados por la fibra en un periodo de tiempo determinado (Jijón Montero & Rojas Carrión, 2017).

El ancho de banda de una fibra óptica está directamente relacionado con su capacidad de transmisión a largas distancias. Este se expresa comúnmente en unidades de MHz/km, lo que indica la frecuencia máxima que puede ser transmitida a través de un kilómetro de fibra óptica sin que la señal se degrade significativamente (Jijón Montero & Rojas Carrión, 2017).

#### ***2.1.3. Tipos de Fibra Óptica***

Las fibras ópticas se dividen en varias categorías según sus características estructurales y de transmisión, lo que las hace adecuadas para diferentes aplicaciones en las telecomunicaciones.

Existen diferentes tipos de fibra óptica, cada uno diseñado para aplicaciones y entornos específicos, que se diferencian principalmente por el tamaño del núcleo y la capacidad de transmisión; se clasifican principalmente en fibra monomodo y fibra multimodo, dependiendo de las características del núcleo y su capacidad de transmisión, cada una con propiedades únicas que determinan su rendimiento, capacidad y alcance.

Este apartado introducirá los tipos de fibra óptica más utilizados, explicando cómo sus características físicas influyen en su uso para aplicaciones de corta y larga distancia. Los subpuntos proporcionarán una visión detallada de cada tipo, su estructura y las ventajas que ofrecen en distintos escenarios de implementación.

### **2.1.3.1. Fibra Monomodo**

La fibra óptica monomodo posee un diámetro de núcleo muy estrecho, generalmente entre 8  $\mu\text{m}$  y 10  $\mu\text{m}$ , permitiendo un solo modo de transmisión. Esto requiere un acoplamiento de luz muy preciso y confinado.

La fibra monomodo tiene bajas pérdidas y dispersión modal inexistente, lo que la hace ideal para enlaces de larga distancia, típicamente usados en redes WAN. Las fuentes de luz utilizadas suelen ser emisores láser especializados, que son más costosos, pero necesarios para su correcto funcionamiento (Nieto Pacheco & Carriel Sevillano, 2020).

### **2.1.3.2. Fibra Multimodo**

La fibra óptica multimodo tiene un núcleo de mayor diámetro, típicamente entre 50  $\mu\text{m}$  y 62.5  $\mu\text{m}$ , permitiendo la transmisión de múltiples haces de luz en diferentes trayectorias o modos. Esta capacidad permite transportar más información y alcanzar velocidades de hasta 100 Gbps.

Sin embargo, es más susceptible a la atenuación por distancia y curvatura, por lo que se usa principalmente en entornos LAN o centros de datos, donde no se requieren grandes distancias, pero sí altas tasas de transferencia de datos. Las fibras multimodo pueden utilizar LED's como fuentes emisoras, lo que simplifica y abarata su instalación y mantenimiento (Nieto Pacheco & Carriel Sevillano, 2020).

### ***2.1.4. Estructura de la Fibra Óptica***

La fibra óptica es un medio de transmisión complejo que debe su eficacia a una estructura bien definida, la cual está compuesta por elementos específicos como el núcleo, el revestimiento y la cubierta protectora; estos componentes trabajan de manera conjunta para garantizar la propagación de la luz con pérdidas mínimas. Asimismo, cada uno de ellos cumple un papel fundamental tanto en la transmisión eficiente de datos como en la durabilidad de la fibra frente a condiciones ambientales adversas, por lo que su correcto diseño resulta esencial.

A partir de ello, en los subpuntos que siguen se analizará en profundidad cada una de estas partes, describiendo sus principales características y explicando cómo contribuyen al funcionamiento óptimo de la fibra óptica en diversas aplicaciones de telecomunicaciones.

Este medio de transmisión consta de tres partes principales: el núcleo, por donde viaja la luz; el revestimiento, que confina la luz en el núcleo mediante reflexión interna total; y la cubierta protectora, que proporciona resistencia y protección contra daños físicos y ambientales.

#### **2.1.4.1. Estructura Básica**

- **Núcleo**

El núcleo de la fibra óptica es la parte central y más importante de la fibra, hecha de vidrio o plástico de alta pureza, que permite la transmisión de luz. El núcleo tiene un alto índice de refracción, lo que facilita la reflexión interna total y permite que la luz se propague eficientemente a lo largo de la fibra.

Los diámetros típicos del núcleo varían dependiendo del tipo de fibra, siendo de aproximadamente 8-10 micrómetros para la fibra monomodo y 50-62.5 micrómetros para la fibra multimodo (Paqui Andrade, 2023).

- **Revestimiento**

El revestimiento, también conocido como cladding, rodea al núcleo de la fibra óptica y tiene un índice de refracción más bajo. Este diseño asegura que la luz que viaja a través del núcleo se refleje internamente y permanezca dentro del núcleo, permitiendo la transmisión de señales ópticas a largas distancias sin pérdidas significativas. El revestimiento generalmente tiene un diámetro de 125 micrómetros (Paqui Andrade, 2023).

- **Cubierta Protectora**

La cubierta protectora es la capa exterior que protege al núcleo y al revestimiento de daños físicos y ambientales. Esta cubierta está hecha de materiales plásticos que proporcionan flexibilidad y resistencia. La cubierta protectora puede incluir múltiples capas para aumentar la durabilidad, proteger contra la humedad, resistir temperaturas extremas y absorber impactos.

El diámetro total de la fibra óptica con la cubierta protectora puede variar, pero generalmente está entre 250 micrómetros y varios milímetros, dependiendo del uso y las condiciones de instalación (Paqui Andrade, 2023).

### ***2.1.5. Tipos de Pérdidas de la Fibra Óptica***

De acuerdo con el autor (Howard, 2020), las pérdidas en la fibra óptica, también conocidas como atenuación, miden la cantidad de luz que se pierde entre la entrada y la salida de la fibra. Estas pérdidas pueden clasificarse en intrínsecas y extrínsecas.

Las pérdidas intrínsecas se deben a la absorción y dispersión del material de la fibra, así como a defectos estructurales. Por otro lado, las pérdidas extrínsecas son causadas por factores externos como empalmes, conectores y flexión de la fibra.

Entender estos tipos de pérdidas es crucial para optimizar el rendimiento de las redes de fibra óptica, ya que permite implementar medidas para reducirlas y mejorar la eficiencia de transmisión.

#### **2.1.5.1. Atenuación de la Fibra Óptica**

Según la empresa corporativa Telpro Madrid (2021), argumenta que la atenuación en la fibra óptica, también conocida como pérdida de transmisión, es la reducción de la potencia de la señal óptica a medida que viaja a lo largo de la fibra. Esta pérdida puede ser causada por factores intrínsecos, como la absorción y dispersión del material de la fibra, así como por factores extrínsecos, como empalmes y conectores. Matemáticamente a través de (Ec. 3), la atenuación se mide en decibelios por kilómetro (dB/km), por lo cual matemáticamente

$$A = \frac{10}{L} * \log_{10} \frac{P_i}{P_o} \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde:

- $A$ : Es la atenuación de la fibra óptica por kilómetro
- $L$ : Es la distancia total de la fibra óptica
- $P_i$ : Es la potencia de entrada
- $P_o$ : Es la potencia de salida

### 2.1.5.2. Dispersión de la Fibra Óptica

La dispersión en la fibra óptica se refiere a la ampliación de los pulsos de luz a medida que viajan a través de la fibra, lo que puede causar distorsiones en la señal. Existen tres tipos principales de dispersión: modal, material y de guía de onda (Rodríguez, 2023).

- **Dispersión Modal**

La dispersión modal ocurre en fibras multimodo y monomodo. En las fibras multimodo, debido a su mayor tamaño de núcleo, varios modos pueden propagarse simultáneamente. Cada modo entra en la fibra en diferentes ángulos y recorre distintas distancias hacia el receptor, lo que puede resultar en la superposición y distorsión de las señales (Telpro Madrid, 2021).

- **Dispersión Material**

La dispersión material se debe a la interacción de la luz con el índice de refracción del material de la fibra. La velocidad de propagación de la luz varía según el índice de refracción, lo que causa la dispersión y la ampliación de los pulsos de luz (Telpro Madrid, 2021).

- **Dispersión de Guía de Onda**

La dispersión de guía de onda ocurre principalmente en fibras monomodo. Esto se debe a que parte de la luz viaja a través del núcleo y otra parte a través del revestimiento, que tienen

diferentes índices de refracción. Esta diferencia en velocidades de propagación entre el núcleo y el revestimiento causa la dispersión de la luz al llegar al receptor (Telpro Madrid, 2021).

### **2.1.5.3. Interferencia y Ruido**

Según el autor Rodríguez (2023), la fibra óptica es inherentemente inmune a interferencias electromagnéticas externas, lo que es una ventaja significativa sobre los cables de cobre. Sin embargo, pueden ocurrir otras formas de ruido, que pueden degradar la señal. Minimizar estas interferencias es crucial para mantener una transmisión clara y eficiente.

Las redes de fibra óptica no están exentas de ciertos tipos de ruido interno y externo que pueden influir en su rendimiento. Entre estos se encuentran el ruido térmico, que se genera en los receptores ópticos debido al movimiento aleatorio de electrones; el ruido de disparo, causado por la fluctuación de fotones en la conversión de luz a señal eléctrica; y el ruido de interferencia, que puede surgir de la interacción de múltiples señales en sistemas densamente multiplexados (UIT-T, 2005).

La dispersión modal, más común en fibras multimodo, también puede introducir distorsiones en la señal debido a diferentes tiempos de llegada de los modos de luz a lo largo de la fibra. La calidad del empalme y la limpieza de los conectores ópticos juegan un papel esencial en la reducción de estos problemas, ya que incluso pequeñas partículas de suciedad pueden provocar pérdidas significativas y reflejos indeseados.

### **2.1.6. Ventanas de Transmisión en la Fibra Óptica**

Las ventanas de transmisión se refieren a los rangos de longitudes de onda donde la atenuación es mínima, permitiendo una transmisión óptima de datos (COFITEL, 2022).

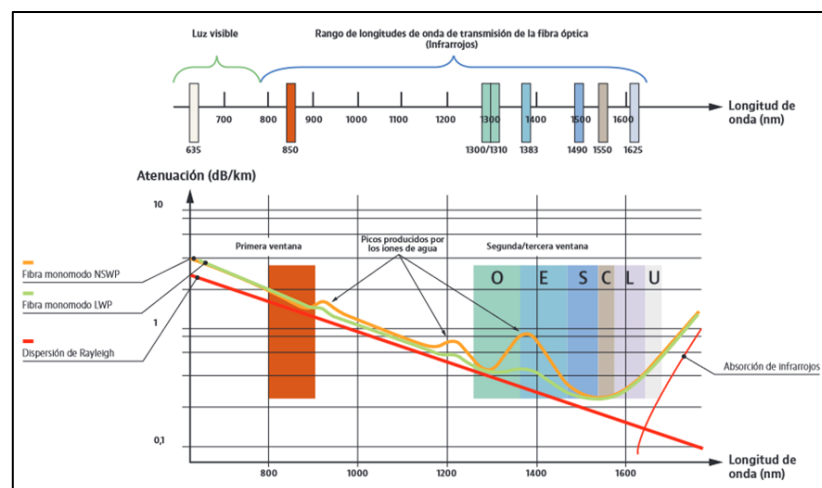
Existen tres principales ventanas de transmisión:

- **Primera Ventana (850 nm):** Utilizada principalmente en sistemas de corto alcance, esta ventana tiene mayor atenuación comparada con las siguientes ventanas, pero es adecuada para aplicaciones de bajo costo con distancias cortas.

- **Segunda Ventana (1310 nm):** Ofrece una menor atenuación y es comúnmente utilizada en redes metropolitanas y de área amplia. La dispersión de material es mínima en esta ventana, lo que mejora la calidad de la señal.
- **Tercera Ventana (1550 nm):** Presenta la menor atenuación y es ideal para largas distancias y altas capacidades de transmisión. Es ampliamente utilizada en enlaces de fibra óptica de larga distancia y en aplicaciones de telecomunicaciones avanzadas.

De acuerdo con la Figura 1, cada ventana está seleccionada en función de la longitud de onda que minimiza la atenuación y maximiza la eficiencia de transmisión.

**Figura 1**  
*Ventanas de transmisión de la fibra óptica*



*Nota. Obtenido de (COFITEL, 2022)*

## 2.2. Redes PON

Las Redes Ópticas Pasivas (PON) son una tecnología de telecomunicaciones que utiliza fibra óptica para la transmisión de datos de manera eficiente y económica. Estas redes funcionan bajo una topología punto a multipunto, en la cual un único hilo de fibra óptica se divide mediante splitters ópticos pasivos para conectar múltiples usuarios sin necesidad de componentes activos entre el transmisor y los receptores.

De acuerdo con, *Juma Chimbo y Chacón Pizarro (2021)*, las señales ópticas en una red PON se transmiten desde el Terminal de Línea Óptica (OLT) ubicado en la central hasta los

Terminales de Red Óptica (ONT) o unidades de red óptica (ONU) en las ubicaciones de los usuarios finales. Esta configuración permite una transmisión de datos robusta y de alta velocidad, minimizando los costos de implementación y mantenimiento debido a la ausencia de elementos activos intermedios.

Las PON se caracterizan por su alta eficiencia en el uso del ancho de banda y su capacidad para soportar una amplia gama de servicios, como internet de alta velocidad, televisión por cable y telefonía. Su diseño pasivo reduce significativamente la necesidad de alimentación eléctrica y mantenimiento en la red, lo que las convierte en una tecnología esencial en las telecomunicaciones modernas, ofreciendo una infraestructura eficiente y económica para la transmisión de datos (Paqui Andrade, 2023)

### ***2.2.1. Tipos de Redes PON***

Las Redes Ópticas Pasivas (PON) son una tecnología de telecomunicaciones que utiliza fibra óptica para la transmisión de datos de manera eficiente y económica. Estas redes funcionan bajo una topología punto a multipunto, en la cual un único hilo de fibra óptica se divide mediante splitters ópticos pasivos para conectar múltiples usuarios sin necesidad de componentes activos entre el transmisor y los receptores.

Además, las redes PON han evolucionado significativamente desde sus primeras versiones para adaptarse a las demandas crecientes de ancho de banda y escalabilidad. Estas tecnologías han sido diseñadas bajo estándares internacionales establecidos por la UIT y el IEEE, garantizando interoperabilidad y eficiencia. Su capacidad de soportar múltiples servicios, como internet de alta velocidad, transmisión de video en alta definición y voz sobre IP, las convierte en una solución robusta para redes de acceso moderno. A continuación, se detallan los principales tipos de redes PON, sus características, capacidades y aplicaciones específicas.

### **2.2.1.1. APON**

APON (ATM Passive Optical Network) utiliza el protocolo ATM para la transmisión de datos. APON representó un hito en el desarrollo de las redes ópticas, su adopción estuvo limitada por la complejidad y los costos asociados al protocolo ATM. Permite la asignación dinámica de ancho de banda, satisfaciendo las demandas de servicios de datos de alta velocidad. Es una de las primeras versiones de redes PON, diseñada para mejorar la eficiencia en la red de acceso (V-SOL, 2022).

La tecnología requería un alto nivel de gestión y sincronización, lo que la hacía menos competitiva frente a estándares más modernos como GPON y EPON, que simplificaron la capa de enlace de datos al utilizar Ethernet. Actualmente, APON es relevante en estudios históricos sobre la evolución de las redes ópticas.

### **2.2.1.2. BPON**

Esta tecnología marcó una transición hacia estándares más avanzados al incluir soporte para transmisión de video de alta calidad y servicios convergentes. BPON (Broadband PON) se basa en APON y admite tasas de transmisión de hasta 622 Mbps. Ofrece funciones avanzadas como la asignación dinámica de ancho de banda y la protección mejorada. BPON es compatible con servicios de acceso a Ethernet, transmisión de video y líneas arrendadas de alta velocidad (V-SOL, 2022).

BPON introdujo el uso de longitudes de onda específicas para separar datos y servicios de video, lo que permitió un mejor aprovechamiento del espectro óptico. Sin embargo, con la llegada de GPON, BPON quedó obsoleta debido a sus limitaciones en capacidad y alcance.

### **2.2.1.3. EPON**

EPON (Ethernet PON) combina la tecnología Ethernet con PON, siguiendo el estándar IEEE 802.3ah. Integra Ethernet en la capa física y el protocolo Ethernet en la capa de enlace

de datos, permitiendo el acceso a Ethernet con la topología de PON. Es ampliamente utilizada en redes de acceso debido a su eficiencia y flexibilidad (V-SOL, 2022).

La simplicidad de EPON lo hace ideal para operadores que desean implementar redes de alta capacidad con costos moderados. Además, su compatibilidad con redes Ethernet preexistentes facilita la transición hacia arquitecturas ópticas. Sin embargo, su principal limitación radica en su alcance y velocidad en comparación con GPON, que ofrece mayores capacidades en aplicaciones FTTH.

#### **2.2.1.4. GEPON**

GEPON (Gigabit Ethernet PON) combina tecnologías Gigabit Ethernet y PON, permitiendo velocidades de hasta 1.25 Gbps simétricas. Proporciona un rendimiento superior para aplicaciones de alta velocidad y gran capacidad, soportando hasta 32 clientes por puerto con un alcance de hasta 20 km. Es ideal para datos, voz y video, y presenta bajas tasas de mantenimiento debido a su uso de componentes pasivos (Paradiso, 2020).

GEPON se destaca por su bajo costo de implementación en redes metropolitanas y empresariales. Es una solución popular en mercados emergentes debido a su relación costo-beneficio, aunque enfrenta desafíos al competir con GPON y XGPON en términos de escalabilidad y soporte para servicios de próxima generación.

#### **2.2.1.5. GPON**

GPON (Gigabit PON), basado en las recomendaciones ITU-T G.984.x. Ofrece velocidades de hasta 2.488 Gbps de bajada y 1.244 Gbps de subida, con alta eficiencia y capacidad de manejar grandes volúmenes de datos. GPON soporta hasta 64 clientes por divisor y cubre distancias de hasta 20 km. Utiliza el método de encapsulamiento GEM y permite un avanzado OAM, siendo ideal para aplicaciones FTTH con una arquitectura robusta y eficiente. Es la tecnología preferida para proporcionar servicios de banda ancha a usuarios finales (Paradiso, 2020).

Además de su robustez, GPON introdujo la capacidad de manejar múltiples servicios en paralelo, como video, datos y voz, gracias a su arquitectura de multiplexación por longitud de onda y asignación dinámica de ancho de banda (DBA) (Montes, 2023). Su adopción masiva en implementaciones FTTH en todo el mundo se debe a su equilibrio entre capacidad, alcance y costo.

#### **2.2.1.6. XGPON**

XGPON (10 Gigabit Passive Optical Network) es un estándar que ofrece una velocidad de descarga máxima de 10 Gbps y una velocidad de carga máxima de 2.5 Gbps. Proporciona una capacidad de ancho de banda significativamente mayor en comparación con GPON, haciéndolo adecuado para aplicaciones que requieren velocidades de transmisión muy altas. Se utiliza frecuentemente en implementaciones que necesitan mayor rendimiento, como redes empresariales y proveedores de servicios de Internet (ISP), que ofrecen conexiones de alta velocidad y aplicaciones que demandan un ancho de banda considerable (Huawei, 2023).

XGPON introdujo el uso de nuevas longitudes de onda para mejorar la coexistencia con GPON, permitiendo la migración progresiva sin reemplazar la infraestructura existente. La implementación de multiplexación por división de tiempo (TDM) y multiplexación por división de longitud de onda (WDM) optimiza la transmisión ascendente y descendente, incrementando la eficiencia del uso del espectro óptico (ITU, 2023).

#### **2.2.1.7. XGSPON**

XGSPON es un estándar avanzado de red óptica pasiva que ofrece velocidades simétricas de hasta 10 Gbps tanto para descarga como para carga. Esta tecnología es una evolución de XGPON y proporciona un rendimiento significativamente mejorado para aplicaciones que requieren altas velocidades de transmisión de datos en ambas direcciones, utiliza la tecnología de multiplexación por división de longitud de onda (WDM) para maximizar la capacidad de transmisión sobre la misma infraestructura de fibra (Montes, 2023).

XGSPON está diseñado para coexistir con tecnologías anteriores como GPON y XGPON, permitiendo una transición escalonada hacia redes de mayor capacidad. Según la recomendación ITU-T G.9807.1, XGSPON no solo mejora la velocidad simétrica, sino que también aumenta la eficiencia energética y la estabilidad de la red, lo que la hace ideal para aplicaciones empresariales críticas y residenciales de alta densidad (Montes, 2023).

#### **2.2.1.8. NGPON2**

NGPON2, especificado por la Recomendación UIT-T G.989.2 (2014), es una red óptica pasiva que soporta velocidades de 40 Gbps descendente y 10 Gbps ascendente. Utiliza multiplexación híbrida por división en el tiempo y de longitud de onda (TWDM), permitiendo coexistencia con sistemas PON anteriores. Es ideal para backhaul de redes móviles, empresas y clientes residenciales, y ofrece configuraciones opcionales para ampliar su capacidad. La compatibilidad con infraestructuras existentes facilita su implementación y actualización.

NGPON2 sobresale por su flexibilidad y capacidad de expansión. Gracias a la multiplexación por división de longitud de onda, esta tecnología permite asignar múltiples canales de ancho de banda sobre una sola fibra, reduciendo significativamente la necesidad de ampliar la infraestructura física. Además, está diseñada para soportar servicios avanzados como redes 5G y soluciones de Internet de las Cosas (IoT), asegurando su relevancia en escenarios futuros de conectividad (Huawei, 2023).

#### **2.2.2. Comparativa de Redes PON**

De acuerdo con el estudio acerca de tipos de redes PON, cada una posee características específicas que las hacen adecuadas para diferentes aplicaciones y necesidades. A continuación, se presenta una comparativa que resume las características más importantes de los principales tipos de redes PON (véase en Tabla 1), incluyendo su velocidad de descarga y carga, tasa de bits, alcance máximo real, estándares, protocolo, y longitud de onda. Esta información es esencial para entender las capacidades y ventajas de cada tipo de red PON.

**Tabla 1**  
*Comparativa de características de tipos de redes PON*

Tipo de Red	Velocidad de Descarga	Velocidad de Carga	Alcance	Estándares	Protocolo	Longitud de Onda
APON	155 Mbps	155 Mbps	10-20 km	G.983	ATM	1310/1490 nm
BPON	622 Mbps	622 Mbps	10-20 km	G.983	ATM	1310/1490 nm
EPON	1 Gbps	1 Gbps	10-20 km	IEEE 802.3ah	Ethernet	1310/1490 nm
GEAPON	1.25 Gbps	1.25 Gbps	10-20 km	IEEE 802.3z	Gigabit Ethernet	1310/1490 nm
GPON	2.488 Gbps	1.244 Gbps	20-60 km	ITU-T G.984.x	Gigabit	1310/1490/1550 nm
XGAPON	10 Gbps	2.5 Gbps	20-60 km	ITU-T G.987.x	10 Gigabit	1577/1270 nm
XGSPON	10 Gbps	10 Gbps	20-60 km	ITU-T G.9807.1	10 Gigabit Symmetric	1577/1270 nm
NGPON2	40 Gbps	10 Gbps	20-60 km	G.989.2	40 Gigabit	1600-1625 nm

*Nota. Obtenido de (Paradiso, 2020)*

### **2.2.3. Ventajas de las Redes PON**

Las Redes Ópticas Pasivas (PON) presentan múltiples ventajas que las han posicionado como una opción preferida para redes de acceso en telecomunicaciones debido a sus múltiples ventajas.

Estas redes utilizan componentes pasivos para la distribución de señales, lo que no solo reduce el consumo de energía, sino también simplifica la infraestructura necesaria para su implementación. Gracias a su diseño eficiente y escalable, las PON permiten una conexión fiable y de alta velocidad a múltiples usuarios sin necesidad de equipos activos intermedios.

Por consiguiente, los siguientes subpuntos detallan los principales beneficios de las redes PON, abordando aspectos como el consumo energético, la simplicidad de la infraestructura y los bajos costos de mantenimiento.

#### **2.2.3.1. Consumo Energético**

Las redes PON tienen un consumo energético muy bajo porque no requieren una fuente de alimentación en la transmisión. La ausencia de componentes electrónicos en la red permite

una operación más eficiente y económica, reduciendo significativamente los costos energéticos (V-SOL, 2022).

El diseño pasivo de las redes PON, y específicamente de XGS-PON, elimina la necesidad de equipos activos entre el Terminal de Línea Óptica (OLT) y las Unidades de Red Óptica (ONU). Esto no solo optimiza el uso de energía, sino que también reduce la huella de carbono asociada a la operación de la red. Según la UIT, esta característica es fundamental para cumplir con los objetivos globales de sostenibilidad en telecomunicaciones (ITU, 2023a).

### **2.2.3.2. Infraestructura**

La infraestructura de PON es sencilla y eficiente. Al utilizar un modo de acceso punto a multipunto, se minimiza la necesidad de cables y equipos en la oficina central y en las instalaciones de los usuarios. Esto reduce la ocupación de espacio y facilita la expansión de la red, permitiendo un retorno de inversión más alto y una implementación más rápida (Rodríguez, 2023).

La arquitectura de XGS-PON está diseñada para maximizar la reutilización de infraestructura existente, permitiendo la coexistencia con tecnologías anteriores como GPON y NG-PON2. Esto es posible gracias al uso de multiplexación por longitud de onda y a la compatibilidad descendente de los equipos ópticos. La simplicidad de la infraestructura también mejora la resiliencia de la red frente a fallos, ya que los componentes pasivos tienen una vida útil más larga y requieren menos mantenimiento (LightOptics®, n.d.)

### **2.2.3.3. Mantenimiento**

El mantenimiento de las redes PON es mínimo debido a su diseño pasivo. Al no tener componentes electrónicos en la red, las PON prácticamente no requieren mantenimiento, lo que reduce los costos operativos y de gestión a largo plazo. Esta simplicidad también facilita la actualización y expansión de la red sin interrupciones significativas en el servicio (V-SOL, 2022).

Los sistemas avanzados como XGS-PON incorporan herramientas de monitoreo remoto, que permiten a los operadores detectar y resolver problemas sin necesidad de inspecciones físicas frecuentes. Por ejemplo, el monitoreo óptico a través de OTDR (Reflectómetro Óptico en el Dominio del Tiempo) integrado en el OLT ayuda a identificar fallos en la fibra o en los conectores con precisión y rapidez. Esto reduce significativamente los tiempos de inactividad y asegura una experiencia continua para los usuarios finales (Huawei, 2023).

### **2.3. Tecnología XGS-PON**

La tecnología XGS-PON (10 Gigabit Symmetric Passive Optical Network) es un estándar desarrollado para satisfacer las crecientes demandas de ancho de banda en aplicaciones residenciales, empresariales y de backhaul móvil. Basada en la recomendación ITU-T G.9807.1, esta tecnología proporciona tasas simétricas de 10 Gbps tanto para enlace descendente como ascendente, lo que la hace ideal para servicios modernos de alta capacidad como video en ultra alta definición, telemedicina y redes IoT.

XGS-PON se caracteriza por su compatibilidad con redes GPON y XGPON, permitiendo una migración gradual y económica hacia mayores capacidades sin requerir reemplazos completos de la infraestructura. Además, la implementación de técnicas avanzadas de multiplexación por división de longitud de onda (WDM) permite maximizar el uso del espectro óptico y minimizar interferencias.

#### ***2.3.1. Definición de Redes XGS-PON***

La tecnología XGS-PON (10 Gigabit Symmetric Passive Optical Network) de acuerdo con la (ITU-T G.9807.1), está descrita como un sistema de red óptica pasiva capaz de soportar una capacidad de transmisión simétrica de 10 Gbps tanto en el enlace descendente (downstream) como en el ascendente (upstream). El sistema XGS-PON está diseñado para ser

utilizado en redes de acceso óptico que sirven aplicaciones residenciales, empresariales y de backhaul móvil.

XGS-PON utiliza una topología punto a multipunto, en la que un único OLT se conecta a múltiples ONU a través de divisores ópticos. Esto optimiza la infraestructura y reduce los costos operativos, mientras que su capacidad de coexistencia con tecnologías anteriores asegura una transición fluida hacia redes más avanzadas. Además, su arquitectura robusta permite satisfacer las demandas de redes 5G y aplicaciones de ultra banda ancha en áreas urbanas y rurales (ITU, 2023).

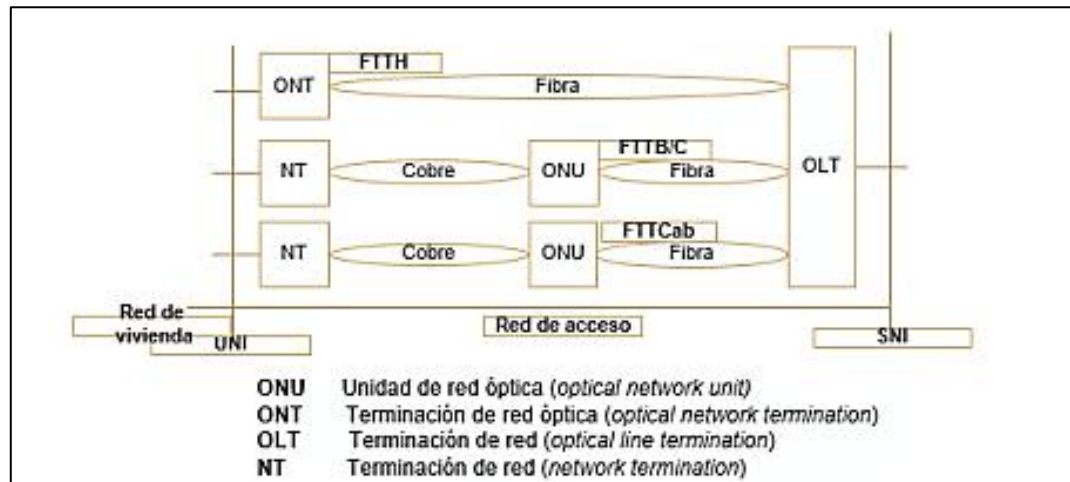
### ***2.3.2. Arquitectura de XGS-PON***

La arquitectura de XGS-PON, según la recomendación ITU-T G.9807.1, se basa en una estructura de red punto a multipunto similar a las tecnologías anteriores, como GPON (G 984, 2008) y XG-PON (G 987, 2016).

Utiliza una única fibra óptica desde el Terminal de Línea Óptica (OLT) en la central hasta múltiples Unidades de Red Óptica (ONU) a través de divisores pasivos, proporcionando una capacidad de transmisión simétrica de 10 Gbps en ambas direcciones.

Conforme se detalla en la (Figura 2), esta arquitectura permite una coexistencia eficiente con tecnologías previas y asegura la alta capacidad necesaria para aplicaciones modernas de telecomunicaciones (ITU, 2023a).

**Figura 2**  
Arquitectura de red para XGS-PON



Nota. Obtenido de (ITU-T 6.9807.1)

### 2.3.3. Requisitos de Capa Física

La capa física de la tecnología XGS-PON es fundamental para garantizar el rendimiento y la fiabilidad en la transmisión de datos. Esta tecnología opera bajo el estándar ITU-T G.9807.1 y requiere una infraestructura que soporte tasas de transmisión simétricas de hasta 10 Gbps en ambos sentidos.

La tecnología XGS-PON, como evolución de las redes ópticas pasivas, presenta exigencias específicas en cuanto a la capa física para lograr un rendimiento óptimo. Los requisitos de esta capa incluyen consideraciones sobre la tasa de transmisión, las longitudes de onda utilizadas y el presupuesto de potencia óptica.

Entre los requisitos esenciales se encuentran la tasa de transmisión y la arquitectura de la Red Óptica de Distribución (ODN), que debe ser capaz de manejar las longitudes de onda especificadas para enlaces ascendentes y descendentes.

Además, el presupuesto de potencia óptica debe ser calculado para asegurar la correcta entrega de la señal, considerando las pérdidas inherentes a la infraestructura y las distancias a cubrir entre el Terminal de Línea Óptica (OLT) y las Unidades de Red Óptica (ONU).

Estos aspectos son esenciales para garantizar una transmisión simétrica de 10 Gbps, tanto para el enlace ascendente como para el descendente, cumpliendo así con las demandas crecientes de servicios de banda ancha. Los subpuntos a continuación exploran en detalle los elementos clave de la capa física y los parámetros necesarios para la correcta operación de XGS-PON.

#### **2.3.3.1. Tasa de Transmisión**

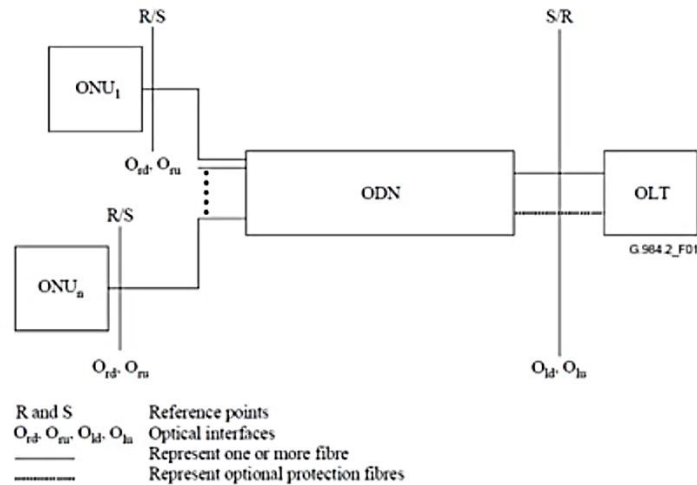
XGS-PON proporciona tasas de transmisión específicas dependiendo del escenario de implementación requerido. Esta tecnología ofrece una tasa nominal simétrica de 10 Gbps, con 10 Gbps tanto en el enlace descendente como en el ascendente. Esta capacidad simétrica es adecuada para satisfacer las demandas de ancho de banda elevado en diversas aplicaciones, asegurando una transmisión eficiente y de alta velocidad en ambas direcciones (ITU, 2023a).

La eficiencia en la transmisión se logra a través de la codificación Non-Return to Zero (NRZ) y el uso de multiplexación por división de tiempo (TDM). Esto permite una asignación eficiente de recursos, garantizando baja latencia y un rendimiento constante incluso en condiciones de tráfico intenso. Adicionalmente, XGS-PON soporta tasas adaptativas para garantizar la calidad del servicio (QoS) en aplicaciones críticas, haciendo uso de técnicas de asignación dinámica de ancho de banda (DBA) para maximizar la eficiencia del enlace (G 987, 2016).

#### **2.3.3.2. Arquitectura de la ODN para XGS-PON**

De acuerdo con la (Figura 3), detalla cómo se encuentra la configuración física genérica de la OND para XGS-PON, en la cual se observa la conexión de la OLT con la ONU a través de la ODN.

**Figura 3**  
Configuración física genérica de la ODN



*Nota. Recomendación ITU-T G.9807.1 (2014)*

En la (Figura 3), se tienen los siguientes puntos de referencia, los cuales se detallan a continuación para comprensión del lector:

- S/R, R/S:** Combinación de puntos S y R existentes en una misma fibra, cuando se opera a través del modo bidireccional.
- $O_{ru}$ ,  $O_{rd}$ :** Interfaces ópticas de subida y bajada en los puntos de referencia anteriores, representadas entre la ONU y la ODN, respectivamente.
- $O_{iu}$ ,  $O_{id}$ :** Interfaces ópticas de subida y bajada para los puntos de referencia S/R, entre la ONU y la ODN, respectivamente.

### 2.3.3.3. Longitudes de onda para XGS-PON

Los sistemas XGS-PON, según la recomendación ITU-T G.9807.1, operan con dos opciones principales de longitudes de onda (véase en Tabla 2):

**1. Conjunto básico de longitudes de onda:** Utiliza las mismas longitudes de onda que XG-PON. Esto permite que el sistema se adapte tanto a las ONU de XGS-PON como a las ONU heredadas de XG-PON. La operación se maneja a través de un esquema de multiplexación por división de tiempo (TDM) en el enlace descendente y un esquema de

multiplexación por división de tiempo de acceso múltiple (TDMA) con velocidad dual en el enlace ascendente (ITU, 2023a).

**2. Conjunto opcional de longitudes de onda:** Reutiliza las longitudes de onda de G-PON, permitiendo a los operadores que no tienen infraestructuras de Gigabit PON heredadas integrar XGS-PON en sus redes. Esto posibilita la coexistencia de XGS-PON con sistemas G-PON mediante la superposición de longitudes de onda, asegurando compatibilidad y flexibilidad en la implementación (ITU, 2023a).

**Tabla 2**  
*Asignación de Longitudes de Onda para XGS-PON*

	<b>Conjunto Básico de longitudes de Onda [nm]</b>		<b>Conjunto Opcional de Longitudes de Onda [nm]</b>	
Upstream	1260	1280	1300	1320
Downstream	1575	1580	1480	1500
		1581 (Exteriores)		

*Nota. Obtenido de Recomendación G.987.1 (ITU, 2023)*

#### **2.3.3.4. Presupuesto de Potencia Óptica**

XGS-PON está diseñado para operar en redes ópticas de distribución (ODN) con pérdidas nominales de 28 o 29 dB, dependiendo del conjunto de longitudes de onda utilizado (véase en Tabla 3).

##### **1. Conjunto Básico de Longitudes de Onda:**

- **Clase N1 de XG-PON:** Este conjunto se ajusta a la clase N1 con una pérdida máxima de 29 dB, considerando la pérdida adicional en el WDM1r para esta banda.

##### **2. Conjunto Opcional de Longitudes de Onda:**

- **Clase B+ de G-PON:** Este conjunto se alinea con la clase B+ con una pérdida máxima de 28 dB, teniendo en cuenta una menor pérdida en el WDM1r para esta banda.

Además de los presupuestos estándar, XGS-PON también soporta otros niveles de potencia óptica para garantizar flexibilidad en diversas condiciones de red:

- N2 (31 dB)
- E1 (33 dB)
- E2 (35 dB)
- C+ (32 dB) de G-PON

Estos niveles adicionales permiten que XGS-PON asegure que los dispositivos en la red, como las ONU y OLT, mejoren la señal óptica correctamente, incluso cuando hay variaciones en la infraestructura de la red. Esto abarca aspectos como la distancia entre el OLT y las ONU, así como el número de divisores ópticos utilizados. (ITU, 2023).

**Tabla 3**  
*Clases de ODN para XGS-PON*

	Unidades	Conjunto Opcional de Longitudes de Onda		Conjunto Básico de Longitudes de Onda			
		Clase B+	Clase C+	Clase N1	Clase N2	Clase E1	Clase E2
<b>Clase OPL (Optical Path Loss)</b>							
Pérdida mínima en la ODN	dB	13	17	14	16	18	20
Pérdida máxima en la ODN	dB	28	32	29	31	33	35

*Nota. Recomendación G.9807.1 (ITU, 2023a)*

### 2.3.3.5. Relación de División

Según (Sofia & Chamba, 2023), la relación de división se refiere a la cantidad de divisores ópticos pasivos que pueden ser utilizados en la red para distribuir la señal desde un único Terminal de Línea Óptica (OLT) a múltiples Unidades de Red Óptica (ONU).

La recomendación ITU-T G.9807.1 establece que una relación de división de 1:64 es el requisito mínimo para permitir la coexistencia eficiente de XGS-PON. Esto significa que una única fibra óptica puede ser dividida en hasta 64 caminos, cada uno conectando a una ONU. Esta capacidad de división es fundamental para la escalabilidad y eficiencia económica de la red, permitiendo a los operadores servir a más usuarios finales sin necesidad de infraestructura adicional significativa.

### 2.3.3.6. Distancia de Fibra Óptica

De acuerdo con (Montes, 2023) la distancia de fibra es fundamental para la extensión y rendimiento de la red. Cada Unidad de Red Óptica (ONU) se caracteriza por su propia distancia de fibra desde el Terminal de Línea Óptica (OLT), lo que define cuánto puede extenderse la red sin perder eficiencia en la transmisión de datos.

- **Distancia Máxima de Fibra**

La distancia máxima entre el OLT y una ONU puede ser de 20 km o 40 km. Este rango asegura que la red puede cubrir áreas extensas por lo cual no se necesita de amplificadores adicionales (G 987, 2016).

- **Distancia de Fibra Diferencial**

La "distancia de fibra diferencial" se refiere a la variación entre las longitudes de fibra de las ONUs, con un máximo permitido de 20 km para asegurar la sincronización y evitar desajustes en la transmisión de datos. Las OLTs sincronizan las ONUs dentro de estos límites, optimizando así el rendimiento de la red. Gestionar estas distancias permite una operación eficiente y una cobertura óptima (ITU, 2023a).

### 2.3.4. Requisitos de la Red Óptica para XGS-PON

La implementación de una red óptica basada en XGS-PON, se basa fundamentalmente en cumplir con requisitos técnicos específicos que garanticen la eficiencia y estabilidad del sistema. Entre los aspectos esenciales se encuentran la velocidad de línea, así como la codificación de línea utilizada, generalmente es el esquema Non-Return to Zero (NRZ), la cual ayuda a mantener una transmisión de datos clara y sin interrupciones, incluso cuando hay gran demanda de ancho de banda.

La definición precisa de los niveles de potencia para los enlaces es otro factor crítico para el rendimiento de la red. Estos niveles deben ajustarse según las características de la

infraestructura y la distancia diferencial de fibra entre el Terminal de Línea Óptica (OLT) y las Unidades de Red Óptica (ONU).

Considerar estas variables permite que la red compense las pérdidas ópticas inherentes al medio, asegurando que las señales sean entregadas adecuadamente a los dispositivos conectados, independientemente de las condiciones operativas.

Estos parámetros técnicos son fundamentales para que la red óptica pueda manejar eficientemente altas demandas de tráfico, manteniendo un rendimiento constante y una transmisión estable.

Los subpuntos que se presentan a continuación profundizan en cada uno de estos requisitos y analizan su impacto en el diseño, implementación y funcionamiento de las redes XGS-PON, permitiendo a los operadores ofrecer servicios de banda ancha de alta capacidad y calidad.

#### **2.3.4.1. Velocidad y codificación de línea**

Para XGS-PON, la velocidad de línea en el enlace ascendente es de 9.95328 Gbps, al igual que en el enlace descendente. La codificación de línea utilizada para ambos enlaces es NRZ (Non-Return to Zero). Este tipo de codificación asegura una transmisión eficiente y confiable de datos garantizando un rendimiento óptimo de la red (Goodson & Zhang, n.d.).

El uso de NRZ como esquema de codificación proporciona simplicidad y eficiencia energética, características esenciales para minimizar el consumo en redes ópticas. Esta codificación, combinada con técnicas de asignación dinámica de ancho de banda (DBA), permite que XGS-PON gestione de manera efectiva las fluctuaciones en la demanda de tráfico, asegurando baja latencia y estabilidad en servicios de alta velocidad como video 4K, telemedicina y aplicaciones de IoT.

### 2.3.4.2. Niveles de Potencia

Las clases de potencia óptica en XGS-PON (N1, N2, E1 y E2) permiten ajustar la red según las necesidades de alcance y pérdida de señal. Las clases E1 y E2 están diseñadas para entornos con mayores distancias o mayores divisores ópticos, mientras que N1 y N2 son ideales para escenarios típicos en redes residenciales. Estas configuraciones garantizan flexibilidad operativa y un rendimiento estable, incluso en infraestructuras densas (ITU, 2023a).

Todos los niveles de potencia que se indican corresponden a una distancia diferencial de fibra de 20 km. Para XGS-PON, con una velocidad de 9.95328 Gbps, se establecen niveles de potencia tanto para el enlace ascendente como descendente, estos niveles se detallan en las Tabla 4 y Tabla 5, respectivamente.

**Tabla 4**  
*Niveles de potencia de XGS-PON downstream*

Parámetros	Unidades	Valores		
<b>Tx OLT (<math>O_{id}</math>)</b>				
Velocidad nominal de línea	Gbits/s	9.95328		
ORL (Optical Return Loss) mínimo de la ODN en $O_{iu}$ y $O_{id}$	dB	32		
Clase de ODN		N1	N2	N3
Potencia media mínima de lanzamiento en S/R	dBm	+2.0	+4.0	+6.0
Potencia media máxima de lanzamiento en S/R	dBm	+5.0	+7.0	+9.0
Potencia óptica reflejada máxima	dB	-15		
<b>Rx ONU (<math>O_{rd}</math>)</b>				
Clases de ODN		N1	N2	E1
Sensibilidad	dBm	-28	-28	-28
Sobrecarga	dBm	-9	-9	-9
Potencia óptica reflejada máxima	dB	10		

*Nota. Recomendación G.9807.1 (ITU, 2023a)*

**Tabla 5**  
Niveles de potencia de XGS-PON para upstream.

Parámetros	Unidades	Valores		
<b>Tx OLT (<math>O_{ru}</math>)</b>				
Velocidad nominal de línea	Gbits/s	9.95328		
ORL (Optical Return Loss) mínimo de la ODN en $O_{iu}$ y $O_{id}$	dB	32		
Clase de ODN		N1	N2	N3
Potencia media de lanzamiento en R/S	dBm	+4.0	+4.0	+4.0
Potencia media de lanzamiento en R/S	dBm	+9.0	+9.0	+9.0
Potencia óptica reflejada máxima	dB	-15		
<b>Rx ONU (<math>O_{iu}</math>)</b>				
Clase de ODN		N1	N2	E1
Sensibilidad	dBm	-26	-28	-30
Sobrecarga	dBm	-5	-7	-9

*Nota. Obtenido de Recomendación G.9807.1 (ITU, 2023a)*

### 2.3.5. Funcionamiento de XGS-PON

El funcionamiento de XGS-PON abarca varios aspectos técnicos y operativos que aseguran su eficiencia y capacidad para proporcionar servicios de alta velocidad en redes de acceso óptico. A continuación, se presentan los conceptos clave de sus mecanismos de transmisión y recepción, así como la gestión de ancho de banda.

El sistema utiliza longitudes de onda específicas para los enlaces descendente (1577 nm) y ascendente (1270 nm), minimizando interferencias y maximizando la calidad de la señal. Los datos en el enlace descendente se distribuyen utilizando multiplexación por división de tiempo (TDM), mientras que, en el ascendente, se aplica multiplexación por acceso múltiple (TDMA), asignando ranuras de tiempo específicas a cada ONU según sus necesidades. Estas características permiten que XGS-PON gestione eficientemente el tráfico de red, asegurando baja latencia y alta estabilidad en aplicaciones críticas.

### 2.3.5.1. Mecanismos de Transmisión y Recepción

La transmisión y recepción de datos utilizan diferentes longitudes de onda para el flujo de información descendente y ascendente, minimizando la interferencia. La transmisión descendente (downstream) se realiza desde el Terminal de Línea Óptica (OLT) hacia las Unidades de Red Óptica (ONU) a una longitud de onda de 1577 nm, permitiendo distribuir contenido de alta capacidad (Reeves, 2024).

Por otro lado, la transmisión ascendente (upstream) permite que los datos enviados desde los dispositivos de los usuarios vuelvan a la red a través de las ONUs hacia el OLT, utilizando una longitud de onda de aproximadamente 1270 nm (Reeves, 2024).

Para facilitar las comunicaciones bidireccionales sin interrupciones entre canales, se emplean diferentes frecuencias de luz. La multiplexación por división de tiempo (TDM) permite que más de una ONU comparta la misma frecuencia de upstream asignando diferentes ranuras de tiempo para cada flujo de datos (ITU, 2023a).

### 2.3.5.2. Gestión de Ancho de Banda

El Terminal de Línea Óptica (OLT) asigna dinámicamente el ancho de banda a las Unidades de Red Óptica (ONU) según la demanda de tráfico mediante la Asignación Dinámica de Ancho de Banda (DBA). Hay dos métodos principales de DBA:

1. **Informes de Estado (SR DBA):** Utiliza informes explícitos de ocupación de buffer solicitados por el OLT y enviados por las ONUs. Esto permite al OLT ajustar la asignación de ancho de banda basándose en los datos precisos del tráfico en espera en cada ONU (Goodson & Zhang, n.d.).

2. **Monitoreo de Tráfico (TM DBA):** El OLT observa directamente la cantidad real de tráfico y ajusta la asignación de ancho de banda según las necesidades actuales (Goodson & Zhang, n.d.).

### **2.3.6. Ventajas y Desventajas de XGS-PON**

De acuerdo con la empresa de tecnología XPONSHOP (2024), es importante analizar las ventajas y posibles desventajas de la tecnología XGS-PON, destacando las siguientes como las más importantes:

#### **2.3.6.1. Ventajas:**

1. **Alta Velocidad:** XGS-PON ofrece velocidades simétricas de hasta 10 Gbps, tanto en subida como en bajada, lo que mejora significativamente la capacidad de la red.
2. **Baja Latencia:** La tecnología XGS-PON proporciona una latencia muy baja, lo que es beneficioso para aplicaciones sensibles al tiempo como los videojuegos en línea y las videoconferencias.
3. **Escalabilidad:** La tecnología es escalable y puede manejar un aumento en la demanda de ancho de banda en el futuro.
4. **Estabilidad y Confiabilidad:** La transmisión es estable y confiable, lo que garantiza un rendimiento constante y predecible.
5. **Compatibilidad con Redes Existentes:** XGS-PON es compatible con las infraestructuras de GPON existentes, lo que facilita la actualización de las redes sin necesidad de reemplazar todo el hardware.

#### **2.3.6.2. Desventajas:**

1. **Costo:** La implementación de XGS-PON puede ser costosa debido a los equipos y la infraestructura necesarios para soportar las altas velocidades.

2. **Compatibilidad Limitada:** Puede haber problemas de compatibilidad con algunos equipos y software más antiguos, lo que podría requerir actualizaciones adicionales.

3. **Complejidad de Implementación:** La implementación y el mantenimiento de XGS-PON pueden ser más complejos en comparación con tecnologías anteriores.

### ***2.3.7. Retos y Limitaciones***

La implementación de XGS-PON enfrenta retos significativos debido a los altos costos iniciales de adquisición de equipos y la necesidad de una infraestructura compatible. Además, se requiere personal altamente capacitado para instalar y mantener la tecnología, lo que puede incrementar los costos operativos y de formación (Hosecom, 2024).

Aunque XGS-PON ofrece altas velocidades, puede enfrentar limitaciones durante picos de alta demanda de ancho de banda. Además, la rápida evolución tecnológica podría dejar obsoleta esta tecnología, y problemas como interferencias y crosstalk pueden afectar la calidad de la señal (Reeves, 2024).

Otra limitación es la coexistencia con tecnologías previas, que puede generar desafíos de compatibilidad y gestión de longitudes de onda. También, la demanda creciente de ancho de banda puede llevar a picos que, si no son gestionados adecuadamente, afecten la calidad del servicio. Finalmente, los avances rápidos en tecnología óptica pueden hacer que los sistemas actuales queden obsoletos en un corto período, exigiendo inversiones constantes para mantenerse competitivos.

### ***2.3.8. Impacto con otras Tecnologías Coexistentes***

XGS-PON está diseñado para coexistir con tecnologías previas como GPON, XGPON y NG-PON2, lo que permite a los operadores migrar gradualmente a redes de mayor capacidad sin reemplazar la infraestructura existente. Esto se logra mediante la asignación adecuada de

longitudes de onda y el uso de dispositivos pasivos como divisores y acopladores ópticos (LightOptics®, n.d.).

#### **2.3.8.1. Coexistencia con GPON**

XGS-PON puede coexistir con GPON utilizando divisores ópticos y gestionando las longitudes de onda de manera adecuada. Esto permite que ambas tecnologías operen simultáneamente en la misma infraestructura de fibra, facilitando una transición gradual sin necesidad de reemplazar todo el equipo existente (Neset, 2017).

La coexistencia se logra asignando diferentes longitudes de onda para los enlaces ascendentes y descendentes de cada tecnología, minimizando las interferencias entre ellas. Además, los operadores pueden implementar módulos WDM pasivos para combinar las señales ópticas de ambas tecnologías en la misma fibra, asegurando una integración eficiente y rentable (Huawei, 2023)

#### **2.3.8.2. Coexistencia con NG-PON2**

XGS-PON también puede coexistir con NG-PON2, permitiendo una actualización progresiva y controlada a redes de mayor capacidad. Esta coexistencia se logra mediante el uso de módulos WDM pasivos que combinan múltiples generaciones de PON en la misma fibra óptica (LightOptics®, n.d.).

NG-PON2, al utilizar multiplexación híbrida por división en el tiempo y de longitud de onda (TWDM), puede operar simultáneamente con XGS-PON en diferentes bandas espectrales. Esto permite a los operadores ofrecer servicios avanzados sin comprometer la calidad de las conexiones existentes (G 989, 2019).

#### **2.3.8.3. Efectos de Interferencia y Compatibilidad**

La coexistencia de XGS-PON con otras tecnologías puede enfrentar desafíos de interferencia, particularmente en la transmisión de datos ascendentes y descendentes. La gestión adecuada de las longitudes de onda y el uso de acopladores ópticos pasivos son

esenciales para minimizar estos efectos y garantizar una compatibilidad óptima (CommScope, n.d.).

Las tecnologías modernas implementan mecanismos avanzados de filtrado y aislamiento de señales para reducir la interferencia entre las diferentes generaciones de PON. Estos mecanismos incluyen el uso de filtros ópticos sintonizables y algoritmos de control de potencia en tiempo real, que aseguran una coexistencia estable y sin interrupciones en la red.

### Capítulo III: Diseño del Sistema

El diseño e implementación de un testbed para analizar la tecnología XGS-PON en una arquitectura FTTH es una tarea clave para evaluar y validar las capacidades de esta tecnología en condiciones controladas. Un testbed permite simular escenarios reales de red, medir el desempeño y realizar ajustes antes de una implementación a gran escala. Esto no solo minimiza riesgos, sino también optimiza recursos al prever posibles limitaciones.

En este capítulo se detallan los elementos necesarios para el diseño y configuración del testbed, incluyendo los requerimientos técnicos y operativos de la red, los equipos necesarios, y el uso del software *OptiSystem* para la simulación. Además, se describen las bases teóricas y prácticas de la arquitectura FTTH basada en XGS-PON, integrando la información desarrollada previamente sobre los componentes y funcionamiento de esta tecnología.

El propósito del diseño es analizar aspectos clave como la capacidad de transmisión simétrica de 10 Gbps, la relación de división en la red, el impacto de la distancia máxima y las configuraciones de tráfico bajo diferentes escenarios. Asimismo, se busca evaluar la coexistencia con tecnologías previas como GPON y garantizar la interoperabilidad y estabilidad del sistema.

La implementación del testbed proporciona un marco experimental para medir parámetros como la pérdida de señal, la relación señal-ruido, la latencia y el desempeño general del enlace óptico. Esto se logrará mediante la configuración de un modelo en *OptiSystem*, complementado con la simulación de herramientas y equipos físicos para la validación de resultados. Este capítulo establece las bases prácticas necesarias para replicar las características reales de una red XGS-PON y optimizar su rendimiento de manera efectiva.

#### 3.1. Arquitectura FTTH y XGS-PON: Fundamentos para el análisis experimental

Las redes Fibra hasta el Hogar (FTTH por sus siglas en inglés) representan el estándar más avanzado en infraestructuras de acceso de banda ancha, donde la fibra óptica se despliega

de manera exclusiva desde la central del operador hasta el usuario final (Verbel S. & Pérez A., 2013). A diferencia de otras arquitecturas FTTx como FTTC (Fiber to the Curb) o FTTN (Fiber to the Node)—que utilizan segmentos intermedios de cobre—, el FTTH garantiza mayor ancho de banda (hasta 10 Gbps simétricos en XGS-PON), menor latencia (< 1 ms) e inmunidad a interferencias electromagnéticas (Joboscan Projects, 2020). Esta capacidad lo convierte en la solución ideal para soportar servicios demandantes como 4K/8K streaming, telemedicina y cloud gaming (Guamán Aguilar, 2022).

### ***3.1.1. Componentes Claves de la Arquitectura FTTH/XGS-PON***

#### **Terminal de Línea Óptica (OLT)**

El OLT es el núcleo de la red XGS-PON, ubicado en la central del operador. Este dispositivo activo gestiona la sincronización y el intercambio de datos, convierte señales eléctricas a ópticas (y viceversa), y asigna dinámicamente el ancho de banda a los usuarios finales. Según Pardo Ríos et al. (2020), su capacidad para soportar múltiples puertos de 10 Gbps simétricos (ITU-T G.9807.1) lo hace esencial en redes de alta densidad. En el testbed del presente trabajo, se evaluará su estabilidad bajo carga máxima y su tolerancia a variaciones de potencia.

#### **Unidad de Red Óptica (ONU/ONT)**

La ONU/ONT es el dispositivo instalado en el domicilio del usuario, responsable de convertir la señal óptica recibida desde el OLT en señales eléctricas compatibles con routers y dispositivos finales Ethernet, Wi-Fi 6, VoIP (Ramírez Patiño, 2022).

Durante la implementación del testbed, uno de los parámetros clave a analizar será la sensibilidad óptica de la ONU, la cual se refiere al nivel mínimo de potencia óptica que el receptor puede detectar y procesar adecuadamente sin pérdida de datos. Para fines de simulación y análisis, se considerará una sensibilidad de (~25 dBm), valor que se encuentra dentro del rango estándar definido por la recomendación ITU-T G.9807.1, el cual establece

niveles de sensibilidad típicos para clases N1 y N2 de XGS-PON. Este umbral garantiza que el equipo receptor pueda operar eficientemente incluso en escenarios donde existen pérdidas por distancia, splitters o dispersión.

### **Fibra Óptica Monomodo y Elementos Pasivos**

Los cables de fibra monomodo G.652.D —con atenuación de 0.2 dB/km— están diseñados para resistir condiciones ambientales adversas (Verbel Sierra et al., 2013). Los elementos pasivos incluyen:

- **Conectores ópticos (SC/APC, LC/UPC):** Garantizan interconexiones con pérdidas menores a 0.3 dB.
- **Divisores ópticos (Splitters):** Relación 1:16 o 1:32 con pérdidas de ~17 dB (Verbel Sierra & Pérez Álvarez, 2013).
- **Atenuadores variables:** Para emular condiciones reales de despliegue (hasta 20 km).

### **Módulos Transceptores SFP+**

Estos dispositivos permiten la conversión óptico-eléctrica en equipos como Routers, Switches u OLTs, destacando su compatibilidad con estándares XGS-PON (10 Gbps) y su flexibilidad para sustituir o instalar componentes de un equipo, como discos duros o módulos de RAM, sin necesidad de apagar o reiniciar el sistema (Bolaños Erazo, 2022).

Los módulos transceptores **SFP+ (Small Form-factor Pluggable Plus)** son componentes críticos en la interfaz entre los equipos electrónicos (OLT, switches) y la red óptica del testbed. Para garantizar la alineación con los estándares XGS-PON, se seleccionaron específicamente módulos **10Gbase-LR (Long Reach)**, basados en los siguientes criterios técnicos respaldados por literatura especializada:

### 1. **Compatibilidad con XGS-PON (ITU-T G.9807.1):**

Estos transceptores soportan 10 Gbps simétricos, requisito fundamental para emular las capacidades de XGS-PON (IEEE, 2022).

Operan en las longitudes de onda estandarizadas para PON: 1310 nm (upstream) y 1550 nm (downstream), asegurando coherencia con la arquitectura óptica pasiva (Bolaños Erazo, 2022).

### 2. **Alcance y Margen de Potencia:**

El formato LR (alcance de 10 km) cubre las distancias típicas en despliegues FTTH urbanos/suburbanos (FS, 2023).

Su sensibilidad de recepción (-14 dBm) se ajusta a los rangos de potencia especificados para OLTs (+3 a +7 dBm) y ONTs (-27 dBm), manteniendo un margen adecuado incluso considerando pérdidas por splitters (1:32) y conectores (ITU-T G.Sup66, 2020).

### 3. **Interoperabilidad y Flexibilidad:**

Los SFP+ 10Gbase-LR son compatibles con equipos de múltiples fabricantes (Huawei, Nokia, ZTE), facilitando la integración en el testbed (IEEE 802.3ae, 2002).

Además, su capacidad de hot-swapping permite reconfiguraciones dinámicas sin interrumpir las pruebas (Berk, 2021).

### **Amplificadores Ópticos**

Aunque no son típicos en redes PON estándar, pueden emplearse para estudios de extensión de cobertura:

- **EDFA:** Amplifica señales en 1550 nm usando fibra dopada con erbio (Nesset, 2017).
- **Amplificadores Raman:** Aprovechan el efecto Raman para mejorar la relación señal-ruido.
- **SOA:** Compactos, pero con mayor ruido, ideales para corto alcance.

### ***3.1.2. Equipos de Monitoreo para Validación Experimental en Redes XGS-PON***

En el desarrollo de un testbed para redes XGS-PON, los equipos de monitoreo son fundamentales para garantizar el cumplimiento de los parámetros de calidad y el diagnóstico de la infraestructura óptica. Estos dispositivos permiten caracterizar el comportamiento de la red bajo diferentes condiciones operativas, siendo esenciales para:

1. Validar el desempeño de los componentes ópticos
2. Detectar y localizar fallos en la infraestructura
3. Asegurar el cumplimiento de los estándares ITU-T G.9807.1 (XGS-PON) y G.984 (GPON)

A continuación, se describen algunos de los principales equipos de monitoreo utilizados en redes FTTH:

#### **1. OTDR (Optical Time-Domain Reflectometer)**

El Reflectómetro Óptico en el Dominio del Tiempo (OTDR) es una herramienta indispensable para el diagnóstico, monitoreo y mantenimiento de redes ópticas FTTH. Su funcionamiento se basa en la emisión de pulsos de luz láser a través de la fibra y el análisis de las señales reflejadas, lo cual permite detectar con precisión eventos como empalmes (pérdidas típicas de 0.1 dB), conectores (0.3 dB) y rupturas a lo largo del tendido. Esta técnica no invasiva permite evaluar la calidad de la fibra, identificar puntos de falla y estimar su localización exacta mediante el análisis del perfil de retrodispersión óptica (Kouadri, 2019).

*Configuración para XGS-PON:* De acuerdo con (ITU, 2023a) los parámetros que se analizan en el desarrollo del testbed son:

- Longitud de onda: 1550 nm (mayor alcance)
- Ancho de pulso: 10 ns-10  $\mu$ s (según distancia a medir)
- Rango dinámico:  $\geq$  45 dB

## 2. OPM (Optical Power Meter)

El Medidor de Potencia Óptica (**OPM**) es un instrumento utilizado para medir la potencia de la señal óptica en la fibra. Estos dispositivos pueden medir diferentes longitudes de onda y son utilizados junto con fuentes de luz láser para evaluar la atenuación en los enlaces de fibra óptica (Verbel Sierra, 2013).

## 3. ORL (Optical Return Loss Meter)

El Medidor de Pérdida por Reflexión Óptica (**ORL**) es un equipo que permite evaluar el nivel de reflexión en una red de fibra óptica. La alta reflexión puede afectar el rendimiento de la red, especialmente en sistemas PON, donde múltiples usuarios comparten el mismo canal óptico. Este dispositivo es esencial para optimizar la eficiencia de la transmisión y minimizar las pérdidas causadas por empalmes o conectores defectuosos (Bolaños Erazo, 2022).

## 4. PON Analyzer

El Analizador PON (**Passive Optical Network Analyzer**) es una herramienta avanzada utilizada para evaluar el estado de la red óptica pasiva. Este equipo permite medir parámetros como la potencia óptica de transmisión y recepción en diferentes longitudes de onda (1310 nm, 1490 nm y 1550 nm), asegurando que los niveles de señal sean adecuados para una comunicación estable. También facilita la detección de interferencias y pérdidas dentro de la red (Pardo Ríos, 2020).

### 3.2. Diseño de Red XGS-PON en un entorno de Simulación

Las redes FTTH basadas en tecnología XGS-PON representan la evolución de las infraestructuras de acceso, destacándose por su arquitectura bidireccional que opera mediante división de longitud de onda (WDM); en donde se tiene un **Downstream**: 1550 nm (hasta 10 Gbps) y **Upstream**: 1310 nm (hasta 10 Gbps).

Esta capacidad simétrica, estandarizada en **ITU-T G.9807.1**, permite soportar servicios avanzados como telemedicina 4K, realidad virtual y aplicaciones industriales IoT (Jobscan Projects, 2020).

### 3.2.1. *Parámetros técnicos estándar y su base Normativa*

Para garantizar que el modelo de simulación replique fielmente el comportamiento de una red XGS-PON real, se establecen parámetros técnicos basados en estándares internacionales y estudios empíricos. Estos valores, detallados en la Tabla 6, son seleccionados para cumplir con los requisitos de potencia óptica y eficiencia de transmisión definidos por organismos como la ITU-T, IEEE e IEC. La configuración considera aspectos clave como la potencia de transmisión del OLT, la sensibilidad de las ONT, las pérdidas en fibra y divisores ópticos, así como el throughput mínimo garantizado, asegurando así la validez técnica de los resultados obtenidos en el entorno de simulación.

**Tabla 6**  
Parámetros normalizados para la simulación XGS-PON

Parámetro	Valor	Base Normativa/Referencia	Justificación
Potencia OLT	$\pm 7$ dBm	ITU-T G.9807.1 (2020)	Margen sobre sensibilidad ( $\pm 3$ dB) ONT
Sensibilidad ONT	-27 dBm	ITU-T G.9807.1, Clase C+	Mínimo para splitter 1:32
Atenuación fibra	0.2 dB/km	IEC 60793-2-50 (2021)	Fibra G.652.D @1550 nm
Pérdidas splitter 1:32	17 dB	Bouda et al. (2022)	Mediciones empíricas
Throughput mínimo	9.5 Gbps	IEEE 802.3av (2009)	Eficiencia MAC del 95%

*Nota. Obtenida de IEEE. (2009)*

Una vez definidos los parámetros técnicos normativos y de diseño, es necesario seleccionar una plataforma de simulación que permita replicar con precisión el comportamiento de la red XGS-PON. En este contexto, con base al estado del arte investigado para el presente trabajo de titulación, se planteó la utilización del software OptiSystem, cuyas características se detallan en el apartado 3.3.

### 3.3. Software de Simulación (OptiSystem)

Para validar el diseño teórico del testbed XGS-PON propuesto en esta investigación, se empleó **OptiSystem v22.0** (Optiwave, 2022), un entorno de simulación especializado en comunicaciones ópticas. Su selección se fundamenta en tres aspectos clave:

- **Validez académica**, al ser ampliamente utilizado en estudios sobre redes PON (Jhovana & Tumiri, 2020);
- **Precisión física**, ya que modela fenómenos esenciales como atenuación, dispersión cromática y efectos no lineales en fibra óptica;
- **Alineación con estándares internacionales**, permitiendo configurar parámetros conforme a la recomendación *ITU-T G.9807.1 e IEEE 802.3av*, esenciales para replicar con fidelidad las condiciones de una red XGS-PON real.

Esta herramienta especializada permite el modelado integral de sistemas de comunicaciones ópticas, y se destaca por su capacidad para analizar con precisión la propagación de señales, las pérdidas ópticas, la interacción entre componentes y la evaluación de métricas de rendimiento.

La versión 22.0 de OptiSystem, según documentación oficial (Optiwave, 2022), incorpora nuevas funcionalidades orientadas al diseño de redes de acceso óptico como PON, lo cual la convierte en una plataforma idónea para desarrollar y validar entornos simulados con base en estándares internacionales.

#### 3.3.1. Características técnicas relevantes

- **Biblioteca de componentes prediseñados:** Incluye elementos esenciales como transmisores láser, divisores ópticos (splitters), amplificadores de fibra dopada con erbio (EDFA), receptores ópticos y herramientas de análisis como el BER (Bit Error Rate) y diagramas de ojo. Esto permite simular condiciones realistas en enlaces ópticos punto a multipunto (Jhovana & Tumiri, 2020).

- **Flexibilidad en el diseño:** La plataforma permite configurar parámetros críticos como longitud de onda, potencia de transmisión, sensibilidad de los receptores, tipo de fibra, conectores y topología de red, lo que facilita la adaptación del entorno simulado al comportamiento de una red XGS-PON real.
- **Análisis multifuncional:** OptiSystem ofrece herramientas para la evaluación de parámetros como la relación señal-ruido óptica (OSNR), la dispersión cromática, la atenuación total del enlace, y la tasa de errores. Estos datos permiten valorar el desempeño de la red bajo diferentes escenarios operativos (Jhovana & Tumiri, 2020).

OptiSystem fue empleado para construir un modelo representativo del testbed XGS-PON, considerando los lineamientos técnicos establecidos por la recomendación UIT-T G.9807.1. La simulación replica de forma precisa la arquitectura propuesta, permitiendo analizar distintos escenarios antes de la implementación física, evaluar el impacto de los parámetros ópticos definidos en el apartado 3.2.1 y optimizar el diseño general del sistema.

### 3.4. Parámetros Operativos

Los parámetros operativos constituyen el conjunto de especificaciones técnicas que guiarán la implementación del testbed XGS-PON propuesto en esta investigación. Estos parámetros fueron definidos en conformidad con la recomendación ITU-T G.9807.1, la cual establece los requisitos funcionales y físicos para redes ópticas pasivas simétricas de 10 Gbps. Su selección asegura la alineación del diseño teórico con las condiciones reales de operación en entornos de acceso de alta capacidad. Estos parámetros se agrupan en cuatro categorías clave, cada una justificada por requisitos normativos y limitaciones físicas:

### 3.4.1. Longitudes de Onda

La asignación de longitudes de onda en XGS-PON ha sido diseñada estratégicamente para maximizar la eficiencia espectral, reducir interferencias y permitir la coexistencia tecnológica con sistemas anteriores como GPON y XG-PON. Esto se logra mediante técnicas de multiplexación por división de longitud de onda (WDM), que permiten transmitir múltiples señales ópticas independientes a través de una única fibra, utilizando diferentes longitudes de onda sin superposición ni degradación del servicio (ITU-T G.9807.1, 2016)

#### Downstream (OLT → ONT):

- Rango: 1575–1580 nm (*XGS-PON DS*).
- Justificación:
  - Asegura separación espectral con GPON/XG-PON.
  - Compatible con amplificadores EDFA (ganancia óptima en torno a 1550 nm).

#### Upstream (ONT → OLT):

- Rango: 1260–1280 nm (*XGS-PON US*).
- Justificación:
  - Minimiza interferencia con el canal GPON (1280–1300 nm).
  - Menor dispersión cromática en fibras monomodo.

### 3.4.2. Relación de División

El estándar XGS-PON permite relaciones de hasta 1:128, sin embargo, para este diseño se ha determinado un valor más conservador:

- Relación definida: 1:16 o 1:32
- Justificación:
  - Reducción de pérdidas ópticas: Relación 1:16 implica pérdidas cercanas a 13–14 dB; 1:32 representa alrededor de 17–18 dB.

- Mejor calidad de señal: Mejora el margen del presupuesto de potencia y reduce el BER.
- Escenarios realistas: Estas relaciones son comunes en redes FTTH urbanas, favoreciendo la estabilidad del sistema sin necesidad de amplificación adicional.

### ***3.4.3. Distancia Máxima***

Se consideran dos escenarios de alcance, en función del entorno de aplicación y el tipo de topología empleada:

- Distancia estándar (20 km):
  - Adecuada para áreas urbanas.
  - Considerada como punto de partida para el testbed.
  - Basada en Clase N2 de ITU-T G.9807.1.
- Distancia extendida (hasta 40 km):
  - Viable con mayor potencia óptica o el uso de amplificadores EDFA.
  - A mayor distancia, se incrementan los efectos de atenuación y dispersión cromática ( $\approx 680$  ps/nm para 40 km).
  - No será prioridad en el primer ciclo de simulación, pero se deja como alternativa de expansión.

### **3.5. Diseño y Configuración de la Topología del Testbed**

Con base en los parámetros operativos definidos previamente, se procede al diseño e implementación de la topología del testbed XGS-PON en el entorno de simulación. Esta sección describe la estructura de red empleada, así como la configuración detallada de cada uno de los componentes principales en OptiSystem, permitiendo establecer un entorno representativo de una red FTTH punto a multipunto. El objetivo es validar la factibilidad técnica del sistema y sentar las bases para la evaluación del desempeño bajo distintos escenarios de tráfico.

### ***3.5.1. Arquitectura de Red FTTH Punto a Multipunto***

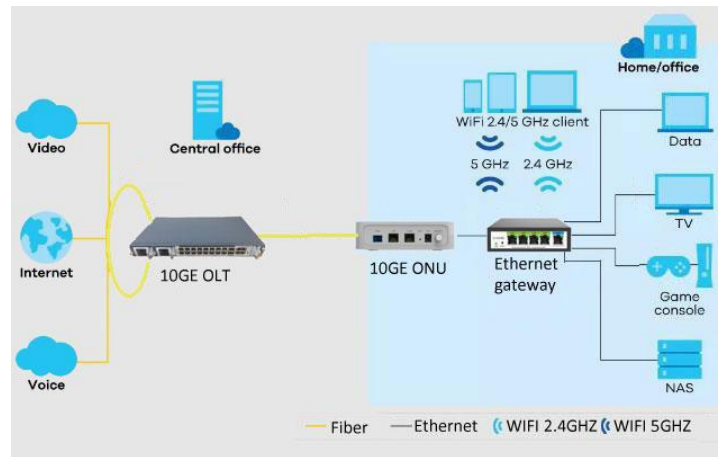
La arquitectura adoptada para el testbed se basa en un modelo punto a multipunto, típico de redes FTTH implementadas con tecnología XGS-PON. Esta configuración permite conectar una única Terminal de Línea Óptica (OLT) ubicada en la central del proveedor con múltiples Unidades de Red Óptica (ONT/ONU) distribuidas en distintos puntos finales, mediante una red pasiva compuesta por fibra y divisores ópticos. La OLT actúa como nodo central, enviando y recibiendo datos hacia y desde los usuarios a través de un medio compartido.

El diseño estructural contempla la inclusión de una Red de Distribución Óptica (ODN) compuesta por fibra monomodo tipo ITU-T G.652.D, con relaciones de división 1:16 y 1:32, según el escenario de simulación. Esta red utiliza divisores ópticos pasivos para compartir la señal entre múltiples usuarios, minimizando el uso de componentes activos intermedios y, por lo tanto, reduciendo costos operativos. Asimismo, se considera un esquema bidireccional de transmisión mediante multiplexación por división en longitud de onda (WDM), con canales independientes para enlace ascendente (1270 nm) y descendente (1577 nm).

La Figura 4 muestra una representación de la arquitectura punto a multipunto de una red FTTH basada en XGS-PON. Desde la central, un OLT transmite señales ópticas que viajan por la fibra hasta un divisor óptico (splitter), que distribuye la señal hacia múltiples usuarios finales. Cada hogar cuenta con una ONT que convierte la señal óptica en servicios de telecomunicaciones. Esta configuración permite compartir eficientemente el medio físico, optimizando el uso de infraestructura pasiva y reduciendo los costos por usuario.

#### Figura 4

*Arquitectura punto a multipunto en una red FTTH XGS-PON*

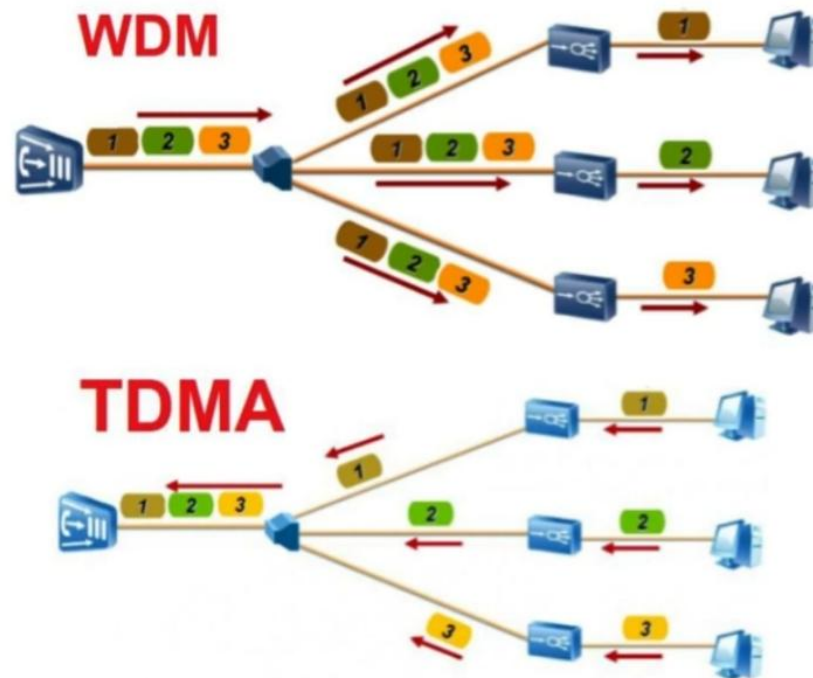


*Nota. Obtenido de A. (2020, octubre 18).*

La Figura 5 compara dos métodos clave de transmisión utilizados en redes ópticas pasivas: multiplexación por división en longitud de onda (WDM) y acceso múltiple por división en el tiempo (TDMA). En el esquema superior (WDM), cada usuario recibe y transmite datos a través de una longitud de onda específica, lo que permite una comunicación simultánea y dedicada. En contraste, el esquema inferior (TDMA) utiliza una única longitud de onda compartida, asignando intervalos de tiempo distintos a cada usuario para transmitir o recibir información. XGS-PON emplea TDMA en el canal ascendente para coordinar las transmisiones de múltiples ONUs, asegurando que no ocurran colisiones de datos, mientras que en el canal descendente el OLT transmite de forma continua a todos los usuarios y cada ONT filtra su información específica.

**Figura 5**

*Comparación entre transmisión WDM y TDMA en redes ópticas pasivas*



*Nota. Obtenido de Paz, A. (s.f.)*

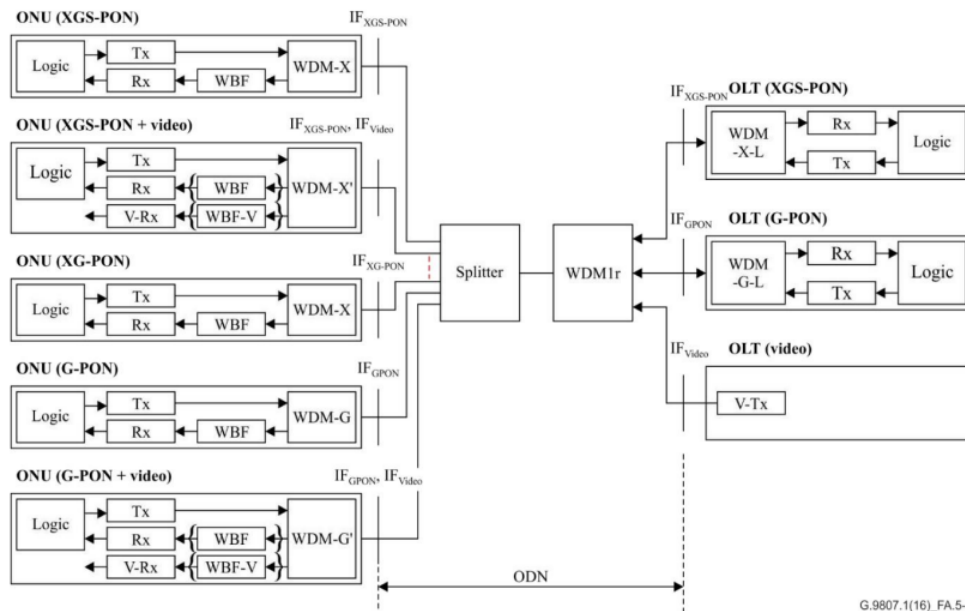
En la Figura 6 se presenta el diseño de red implementado en el entorno de simulación OptiSystem para el desarrollo del testbed XGS-PON. Esta topología representa un modelo de red FTTH punto a multipunto con capacidad de coexistencia entre tecnologías G-PON y XGS-PON, tal como se contempla en despliegues reales de transición tecnológica. La configuración incluye múltiples tipos de la ONU, conectadas a través de una Red de Distribución Óptica (ODN) que incorpora un divisor óptico pasivo y un multiplexor/desmultiplexor WDM (WDM1r).

Cada ONU cuenta con módulos de transmisión y recepción óptica, así como con filtros de banda (WBF) y componentes WDM específicos (WDM-X o WDM-G), cuya función y justificación —descrita en la Sección 2.3 de esta tesis— es garantizar la correcta separación y direccionamiento de las señales ópticas según la tecnología empleada. Estos filtros permiten aislar las longitudes de onda correspondientes (por ejemplo, 1577 nm para downstream y 1270 nm para upstream), evitando interferencias entre tecnologías que comparten la misma

infraestructura pasiva. Los módulos WDM, por su parte, combinan y demultiplexan dichas señales, de modo que la OLT procese únicamente las longitudes de onda de su dominio operativo. Gracias a esta estructura simulada, es posible validar la factibilidad técnica del sistema bajo distintos escenarios de tráfico y carga en OptiSystem.

**Figura 6**

*Diseño de coexistencia XGS-PON con G-PON con longitud de onda básica.*



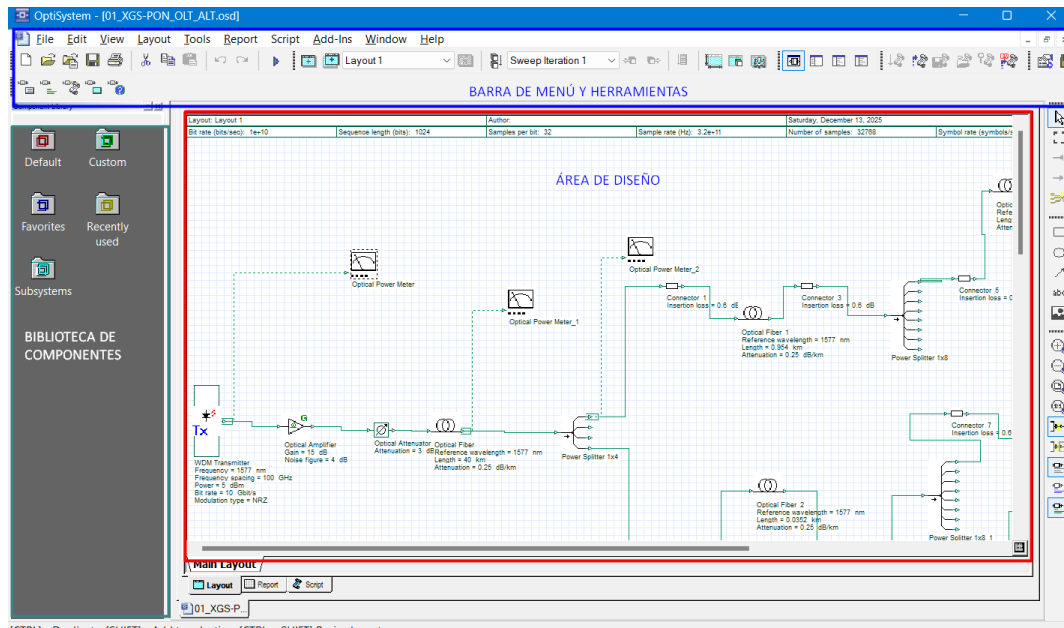
*Nota. Obtenido de UIT-T G.9807.1 (2021).*

### 3.5.2. Configuración en el Simulador OptiSystem

Para validar la arquitectura propuesta, se implementa la red FTTH en el entorno de simulación OptiSystem v22.0. Previo al análisis detallado de la arquitectura simulada, es fundamental destacar la importancia de la interfaz gráfica de usuario (GUI) que ofrece OptiSystem v22.0, como se destaca en la Figura 7, la cual constituye una herramienta clave en el proceso de diseño y evaluación de redes ópticas. Esta interfaz permite construir modelos visuales arrastrando y conectando módulos funcionales, representando dispositivos reales como transmisores, divisores, fibras, detectores y analizadores. Cada componente incluye un conjunto de parámetros configurables que reproducen condiciones reales de operación,

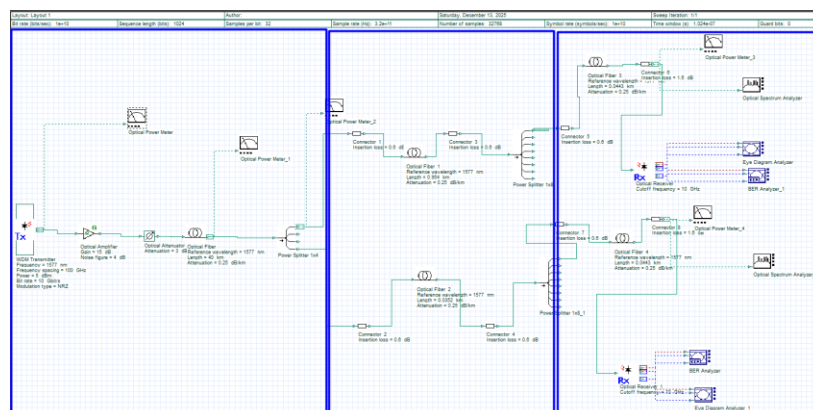
haciendo posible la evaluación detallada del desempeño de la red bajo diferentes configuraciones y condiciones de tráfico.

**Figura 7**  
*Entorno gráfico de simulación de OptiSystem v22.0*



Posteriormente la Figura 8 muestra la disposición de los bloques principales de la simulación: el bloque OLT (en rojo), donde se genera la señal óptica; el bloque ODN (en azul), que representa la red de distribución óptica pasiva; y el bloque ONT (en verde), donde se emula la recepción y análisis de la señal en múltiples usuarios. Esta representación gráfica sirve como base para la descripción detallada de los elementos utilizados en cada sección, lo cual se aborda a continuación.

**Figura 8**  
*Componentes utilizados en la simulación en Optisystem v22.0*

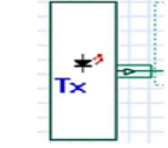
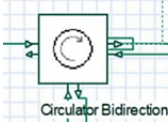
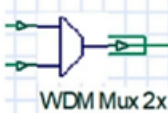

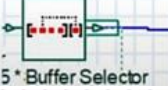
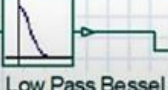


Para la implementación del testbed de la red XGS-PON en el simulador OptiSystem v22.0, se utiliza un conjunto específico de bloques funcionales que permiten representar tanto el plano físico como lógico de una red óptica pasiva de próxima generación. Con el objetivo de detallar su funcionamiento, los componentes han sido organizados gráficamente en bloques correspondientes a la OLT, la ODN y la ONT, los cuales son descritos a continuación.

### 3.5.2.1. Componentes de la OLT

La Tabla 6 representa el conjunto de bloques utilizados en la cabecera de red, es decir, en el nodo OLT (Optical Line Terminal), así como algunos módulos asociados al procesamiento de señal en la recepción. Estos componentes son esenciales para la generación, multiplexación, envío y posterior detección de la señal óptica, simulando el entorno operativo del transmisor en una red XGS-PON. Entre los cuales tenemos:

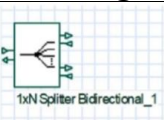

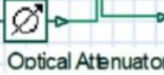
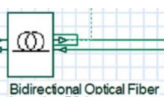
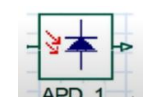
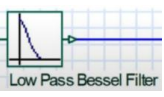
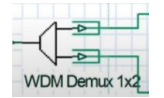
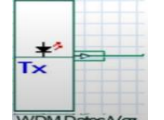
**Tabla 6**  
*Componentes de simulación. Bloque OLT y procesamiento de señal*

Nombre	Simbología	Descripción
Bloque WDM		Genera la señal óptica modulada que será enviada por la red. Opera con una o varias longitudes de onda dependiendo del tipo de multiplexación configurada
Circulador bidireccional		Permite la transmisión y recepción simultánea de señales descendentes y ascendentes en una misma fibra sin interferencias.
Multiplexor WDM 2x1		Combina dos señales ópticas de distintas longitudes de onda en un solo canal para simular coexistencia de tecnologías PON.
Fotodiodo de avalancha (APD)		Convierte la señal óptica recibida en señal eléctrica amplificada, facilitando la detección de señales de baja potencia.
Buffer Selector		Selecciona intervalos específicos de la señal para su análisis detallado durante pruebas de rendimiento o retardo.
Filtro Bessel paso bajo		Elimina ruido de alta frecuencia y suaviza la señal eléctrica para asegurar una detección estable y precisa de los datos.

### 3.5.2.2. Componentes de la ODN

La Figura 10 agrupa los elementos que constituyen la Red de Distribución Óptica (ODN), que es la sección intermedia entre el OLT y las ONT. Este conjunto de componentes tiene como objetivo simular el entorno físico compartido de la red, incluyendo la división de la señal óptica, la atenuación, y la propagación sobre fibra. Entre los cuales tenemos:

**Tabla 7**  
*Componentes de simulación. Bloque ODN y elementos intermedios.*


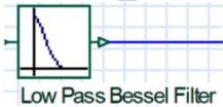
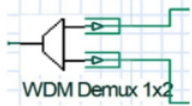
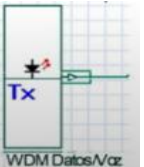
Nombre	Simbología	Descripción
Divisor bidireccional 1xN		Distribuye la señal descendente hacia múltiples usuarios y permite el retorno de señales ascendentes por la misma fibra.
Retardo óptico		Introduce latencia controlada para simular distintas distancias entre la OLT y las ONT.
Atenuador óptico		Combina dos señales ópticas de distintas longitudes de onda en un solo canal para simular coexistencia de tecnologías PON.
Fibra óptica bidireccional		Representa el medio de transmisión que transporta señales ascendentes y descendentes con parámetros configurables.
Fotodetector APD		Convierte la señal óptica recibida en señal eléctrica para su posterior procesamiento o análisis.
Filtro Bessel		Reduce el ruido de la señal eléctrica y mejora la calidad para una correcta detección de datos.
Demultiplexor WDM 1x2		Separa señales ópticas de diferentes longitudes de onda en canales independientes.
Transmisor WDM (datos/voz)		Genera la señal óptica ascendente del usuario hacia la OLT usando una longitud de onda distinta a la descendente.

### 3.5.2.3. Componentes de la ONT

La Figura 11 presenta los módulos ubicados en el extremo del usuario, correspondientes al nodo ONT (Optical Network Terminal). Esta parte de la simulación emula la recepción de servicios por parte del usuario final y su eventual transmisión de datos hacia la red. Entre los cuales tenemos:

**Tabla 8**

*Componentes de simulación. Bloque ONT y procesamiento final.*

Nombre	Simbología	Descripción
Fotodetector APD		Convierte la señal óptica descendente en señal eléctrica, permitiendo la recepción de señales de baja potencia.
Filtro Bessel		Reduce el ruido de la señal eléctrica y mejora la estabilidad del dato recuperado.
Demultiplexor WDM 1x2		Separa la señal óptica por longitudes de onda para diferenciar y direccionar los servicios descendentes.
Transmisor WDM		Representa el medio de transmisión que transporta señales ascendentes y descendentes con parámetros configurables.

### 3.6 Escenarios de Prueba (Testbed)

Esta sección describe los escenarios que conforman los entornos de simulación del testbed, además de establecer los elementos y parámetros de configuración que permitan su operación en conjunto dentro del software de OptiSystem, respecto a una implementación para entornos físicos reales.

#### 3.6.1 Escenario 1: Distancia máxima

La tecnología XGS-PON, definida por la recomendación ITU-T G.9807.1, establece como parámetro fundamental el presupuesto de potencia óptica del sistema, el cual condiciona la distancia máxima de transmisión, el nivel de división de la red y la calidad del servicio entregado a los usuarios finales, sin embargo, la recomendación no establece una distancia máxima de referencia obligatoria, por lo que la distancia de 40 km se toma como una distancia límite técnica para la evaluación del sistema.

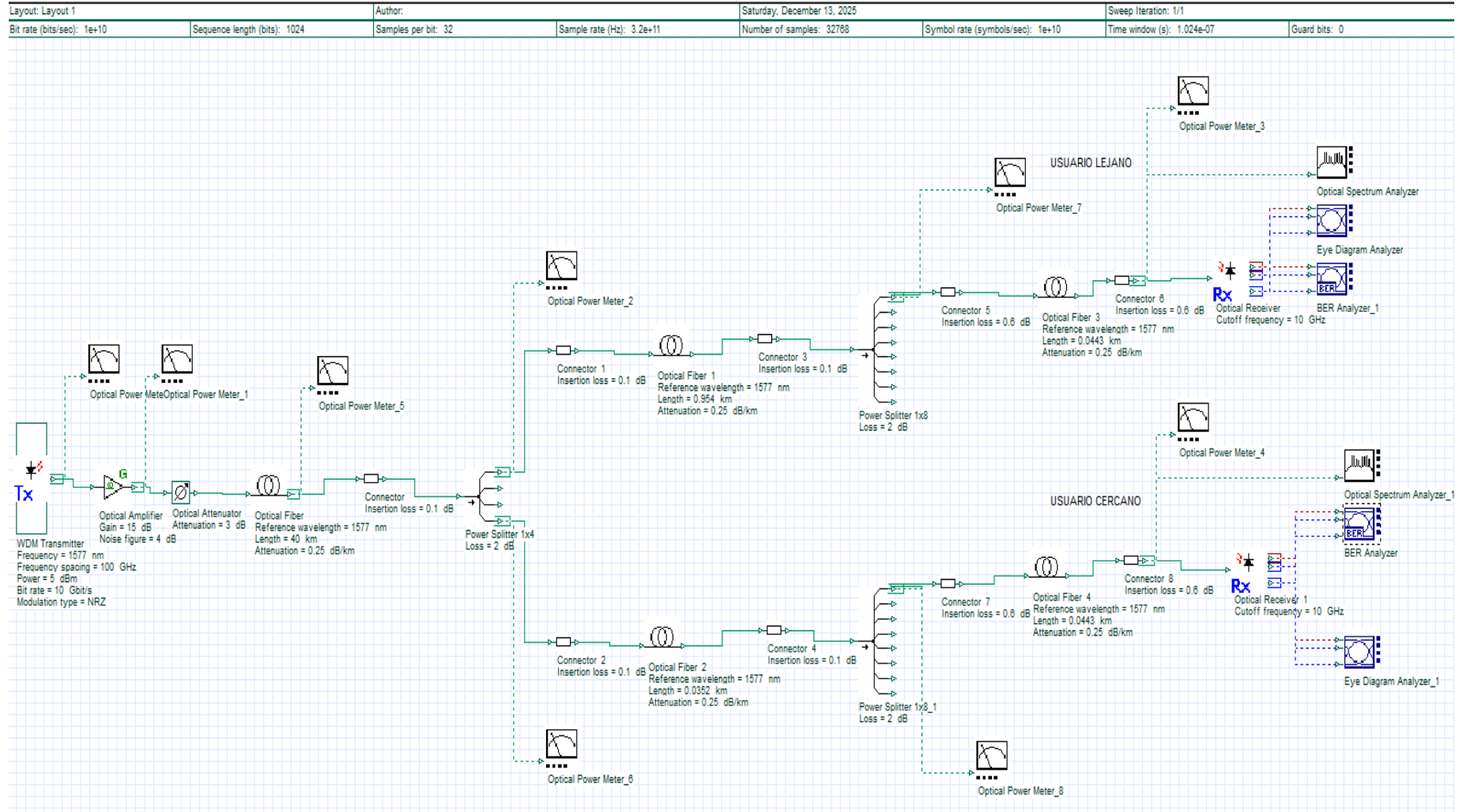
El primer escenario plantea una evaluación de distancia máxima, ya que emplea un enlace de fibra óptica de 40 km con el fin de poner a la tecnología XGS-PON el enlace a pruebas cerca del límite operativo. Este escenario posibilita evaluar el comportamiento de la

red con elevados niveles de atenuación acumulada, típica en despliegues rurales o de acceso extendido, donde la OLT está físicamente distante de los usuarios finales.

Adicionalmente, el escenario incorpora una arquitectura de doble nivel de splitteo, conformada por un primer divisor  $1 \times 4$  y un segundo divisor  $1 \times 8$ , alcanzando un factor total de división  $1 \times 32$ , representativo de topologías PON reales. No obstante, este esquema introduce pérdidas adicionales significativas, lo que incrementa la exigencia sobre el presupuesto óptico del sistema, de modo que, para garantizar el cumplimiento de los márgenes de potencia definidos por la norma, se incorpora un amplificador óptico EDFA en el tramo descendente, operando a 1577 nm, como una solución de diseño de carácter experimental para escenarios de alcance extendido (Long-Reach PON).

La Figura 9 presenta el diagrama de simulación correspondiente a este escenario, el cual se encuentra conformado por un transmisor WDM que simula el comportamiento de la OLT, un enlace de fibra óptica monomodo de 40 km, elementos pasivos de la red de distribución óptica y módulos receptores que emulan a las ONT. El desempeño del sistema se evalúa mediante diagramas de ojo, analizadores de BER, medidores de potencia óptica y analizadores de espectro, permitiendo validar la viabilidad técnica de XGS-PON bajo condiciones exigentes y caracterizar su comportamiento en el peor caso operativo.

**Figura 9**  
*Diagrama esquemático en OptiSystem del primer escenario*



### 3.6.2 Escenario 2: División de señal

El segundo escenario del testbed se plantea como una extensión del escenario de distancia máxima, con el objetivo de analizar el comportamiento de la tecnología XGS-PON bajo condiciones de carga más exigentes, incrementando significativamente el nivel de splitteo de la red, lo que conlleva a que la arquitectura en esta simulación considere un primer nivel de división  $1 \times 16$ , seguido de un segundo nivel  $1 \times 8$ , alcanzando un factor total de splitteo  $1 \times 128$ , lo cual representa un escenario de alta densidad de usuarios y pérdidas ópticas acumuladas superiores a las de un despliegue PON convencional.

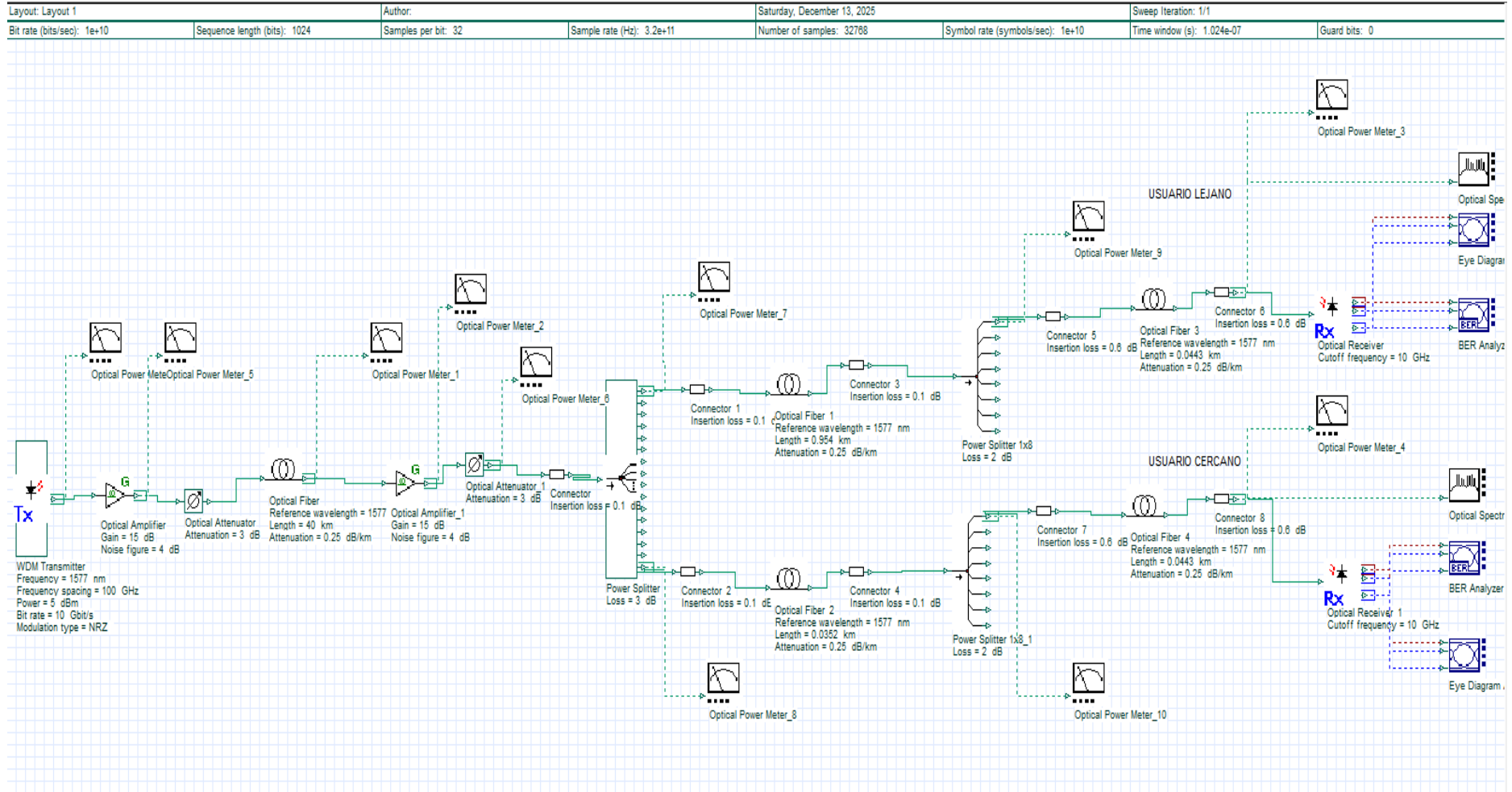
Según la Recomendación UIT-T G.9807.1, las clases de presupuesto óptico más altas (N2, E1 y E2) permiten pérdidas totales máximas de hasta 31 dB, 33 dB y 35 dB, respectivamente. Sin embargo, el alto nivel de separación sumado a la atenuación causada por 40 km de fibra monomodo que excede los límites de potencia especificados para estos tipos, requiere mecanismos de compensación óptica adicionales para garantizar un funcionamiento confiable del sistema.

Además, este segundo banco de pruebas establece un esquema de amplificación distribuido de dos amplificadores ópticos EDFA, en los cuales el primero se ubica en el transmisor con el propósito de compensar la pérdida inicial del despliegue del enlace de fibra; de manera complementaria, el segundo amplificador está ubicado en el tramo descendente de la fibra de 40 km para restaurar el nivel de potencia óptica, lo que permite mantener una alta relación de división y asegurar un desempeño adecuado del sistema.

El diagrama de simulación del segundo escenario, representado en la Figura 10, inicia con un transmisor WDM que simula el comportamiento de la OLT en una red XGS-PON, generando una señal óptica descendente a 1577 nm con una velocidad de 10 Gb/s y modulación NRZ. La señal amplificada es propagada a través del enlace de fibra óptica y distribuida

mediante los niveles de splitteo, siendo finalmente recibida por los receptores ópticos, donde se evalúa su desempeño mediante diagramas de ojo, analizadores de BER, medidores de potencia óptica y analizadores de espectro.

**Figura 10**  
*Diagrama esquemático en OptiSystem del segundo escenario*



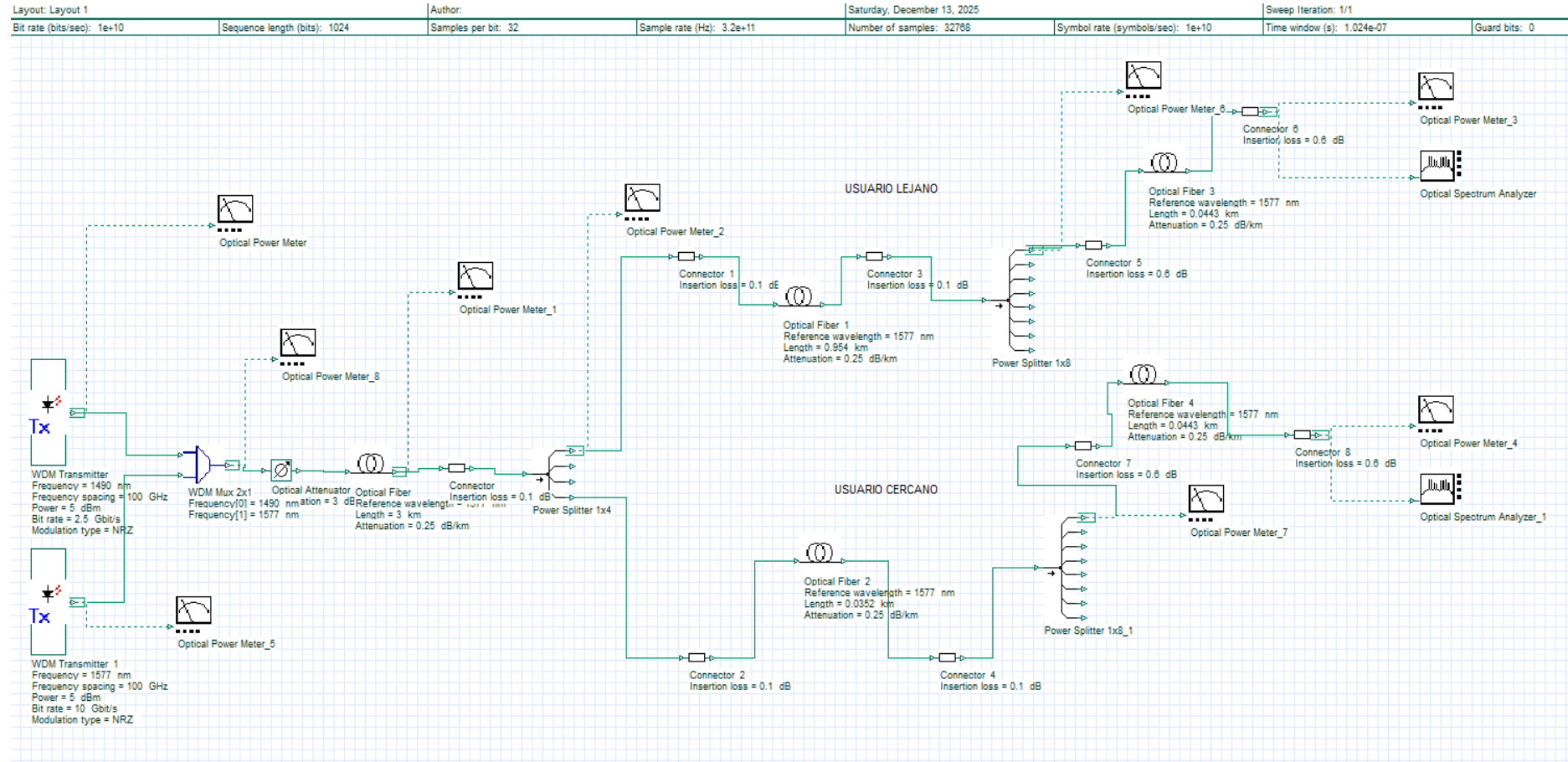
### 3.6.3 Escenario 3: Coexistencia tecnológica

El tercer escenario del testbed tiene como objetivo analizar la viabilidad de operación simultánea de las tecnologías XG-PON y XGS-PON sobre una misma red de distribución óptica (ODN), lo cual responde a una necesidad real de los operadores de telecomunicaciones de evolucionar progresivamente sus redes de acceso hacia tecnologías de mayor capacidad. Este enfoque permite una migración gradual, evitando la sustitución total de la infraestructura existente, optimizando inversiones y reduciendo el impacto operativo sin afectar la continuidad de los servicios.

Este escenario considera la transmisión simultánea de señales downstream de las tecnologías XG-PON y XGS-PON mediante multiplexación por longitud de onda (WDM), lo que conlleva a que se puede utilizar el mismo enlace de fibra óptica para el funcionamiento simultáneo de las dos tecnologías. Por ende, la adecuada separación espectral de las señales garantiza la coexistencia de ambas tecnologías sin la presencia de interferencias significativas, lo que permite preservar la integridad de cada servicio; de manera complementaria, la red incorpora elementos pasivos tales como divisores ópticos dispuestos en dos niveles de *splitteo* 1x32, reproduciendo de este modo una topología de acceso PON realista y representativa de un entorno con múltiples usuarios.

El diagrama de simulación del tercer escenario, representado en la Figura 11, inicia con dos transmisores WDM que simulan el comportamiento de la OLT para cada tecnología, generando señales ópticas descendentes a 1490 nm para XG-PON y 1577 nm para XGS-PON. Estas señales son combinadas y distribuidas a través de la red pasiva compartida y, finalmente, separadas en el extremo receptor mediante dispositivos WDM para su análisis individual. El desempeño del sistema es evaluado mediante medidores de potencia óptica y analizadores de espectro, permitiendo verificar la correcta coexistencia espectral y los niveles de potencia de las señales transmitidas.

**Figura 11**  
*Diagrama esquemático en OptiSystem del tercer escenario*



### 3.7. Implementación del Testbed

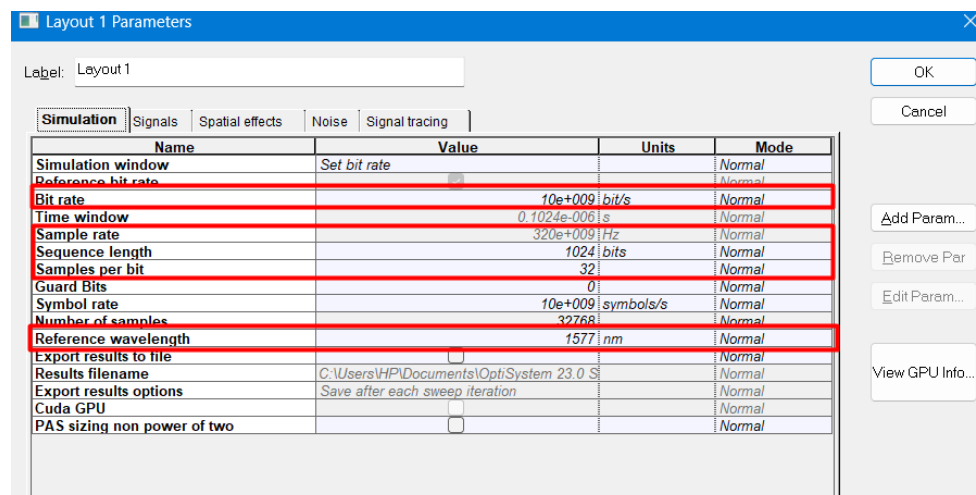
#### 3.7.1 Escenario 1: Distancia máxima

Para la implementación del primer escenario de evaluación, correspondiente al análisis de distancia máxima en una red XGS-PON, es necesario establecer la configuración de los parámetros globales de simulación en OptiSystem, los cuales definen las condiciones temporales, espectrales y de velocidad bajo las cuales opera todo el sistema. Esta configuración es fundamental y es representada en el bloque de configuración de la Figura 12, ya que garantiza la coherencia entre los distintos bloques del diagrama y la correcta representación del comportamiento físico de la tecnología evaluada.

En primer lugar, se configuró una tasa de bits de 10 Gb/s, correspondiente a la velocidad estándar de transmisión downstream en XGS-PON, habilitando el bit rate de referencia para sincronizar todos los componentes del sistema. Asimismo, se establece una longitud de secuencia de 1024 bits y un valor de 32 muestras por bit, los cuales permiten el análisis de métricas como la tasa de error de bit (BER) y el diagrama de ojo. Adicionalmente, establece una frecuencia de muestreo de 320 GHz y una ventana temporal de simulación de 0,1024  $\mu$ s, garantizando una representación significativa de la señal y finalmente una longitud de onda de referencia de 1577 nm, correspondiente al canal descendente de la tecnología XGS-PON.

**Figura 12**

*Parámetros de configuración del ambiente de simulación XGPON*

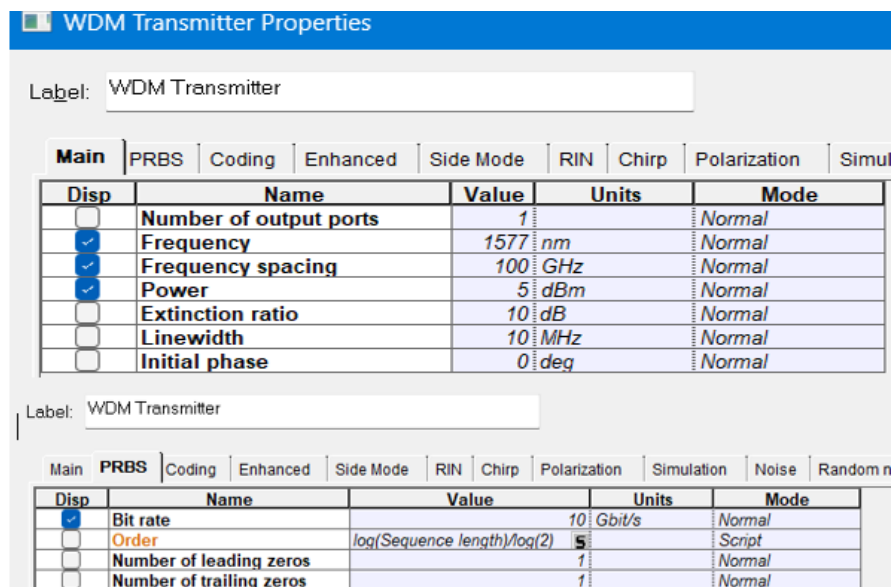


### a) *Parámetros del transmisor WDM*

Los parámetros de configuración del transmisor WDM pertenecientes a la Figura 13, establecen un único puerto de salida, operando a una longitud de onda central de 1577 nm, correspondiente al canal descendente de la tecnología XGS-PON. Se estableció un espaciado espectral de 100 GHz, garantizando una adecuada separación entre canales y evitando interferencias, junto con una potencia de salida de 5 dBm, valor representativo de los niveles típicos de transmisión en la OLT. Además, de establecer la velocidad de transmisión de 10 Gbps/s correspondiente a esta tecnología.

### Figura 13

*Parámetros de configuración del transmisor WDM*

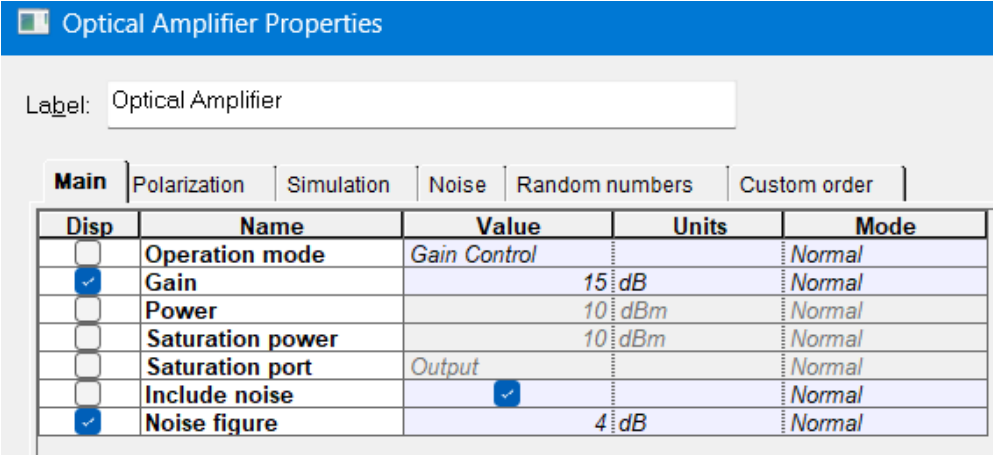


### b) *Parámetros del amplificador EDFA*

Los parámetros que permiten el funcionamiento del amplificador óptico se presentan en la Figura 14, que fueron definidos considerando criterios de diseño del enlace y el comportamiento físico de amplificadores ópticos reales. Se seleccionó el modo de control de ganancia fija con un valor de 15 dB, con el fin de compensar de manera controlada las pérdidas introducidas por el enlace de fibra y los elementos pasivos de la red de distribución.

La potencia de saturación del amplificado es establecida en 10 dBm, lo que asegura que el amplificador funcione dentro de su rango lineal. Además, dentro de los elementos de configuración del dispositivo se añade el valor del ruido de emisión espontánea amplificada (ASE), estableciendo una cifra de ruido de 4 dB, representativa de los amplificadores comerciales.

**Figura 14**  
*Parámetros de configuración del amplificador óptico*



Disp	Name	Value	Units	Mode
<input type="checkbox"/>	Operation mode	Gain Control		Normal
<input checked="" type="checkbox"/>	Gain	15	dB	Normal
<input type="checkbox"/>	Power	10	dBm	Normal
<input type="checkbox"/>	Saturation power	10	dBm	Normal
<input type="checkbox"/>	Saturation port	Output		Normal
<input type="checkbox"/>	Include noise	<input checked="" type="checkbox"/>		Normal
<input checked="" type="checkbox"/>	Noise figure	4	dB	Normal

### *c) Parámetros de la fibra óptica*

El enlace de fibra óptica monomodo presenta sus características en base a la información de la Figura 15, donde se utiliza una longitud de onda de referencia definida por el usuario de 1577 nm, correspondiente al canal descendente de la tecnología XGS-PON. Además, establece una longitud total de 40 km, representativa de un escenario de acceso extendido, y se habilitó el efecto de atenuación, definiendo un coeficiente de 0,25 dB/km.

**Figura 15**  
*Parámetros de configuración de la fibra óptica*

Disp	Name	Value	Units	Mode
<input type="checkbox"/>	User defined reference wavelength	<input checked="" type="checkbox"/>		Normal
<input checked="" type="checkbox"/>	Reference wavelength	1577	nm	Normal
<input checked="" type="checkbox"/>	Length	40	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	0.25	dB/km	Normal
<input type="checkbox"/>	Attenuation vs. wavelength	Attenuatio		Normal

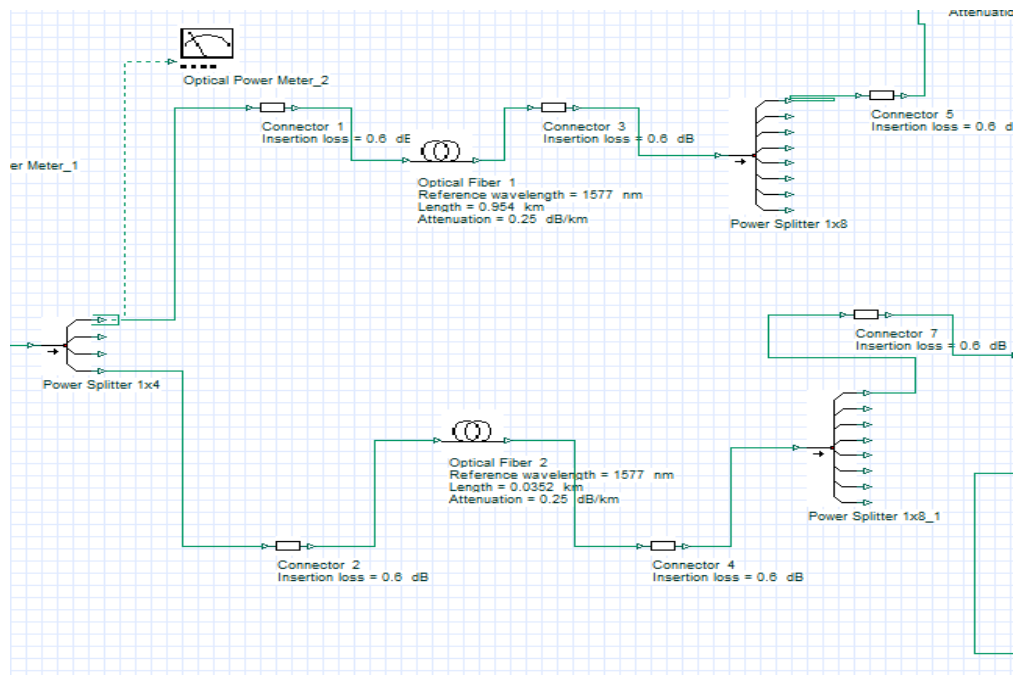
**d) Parámetros de la red de distribución**

La red de distribución óptica posee tramos adicionales de fibra óptica monomodo como se muestra en la Figura 16, permite identificar que la configuración mantiene los mismos parámetros definidos previamente en la fibra óptica de la sección anterior, en particular la longitud de onda de referencia de 1577 nm y el coeficiente de atenuación de 0,25 dB/km (ITU-T G.652).

La principal variación en esta etapa corresponde a la longitud de los enlaces, los cuales se ajustan a valores representativos de la red de acceso secundaria, permitiendo modelar de forma más precisa la distribución física el tramo más cercano y lejano entre los nodos de splitteo y los usuarios finales. Estos tramos de fibra, en conjunto con los conectores y divisores ópticos 1×8, reproducen las pérdidas típicas de la red de distribución pasiva y permiten evaluar el impacto del splitteo y la distancia adicional sobre el desempeño del sistema XGS-PON.

**Figura 16**

*Esquema y parámetros de los elementos de la red de distribución óptica*

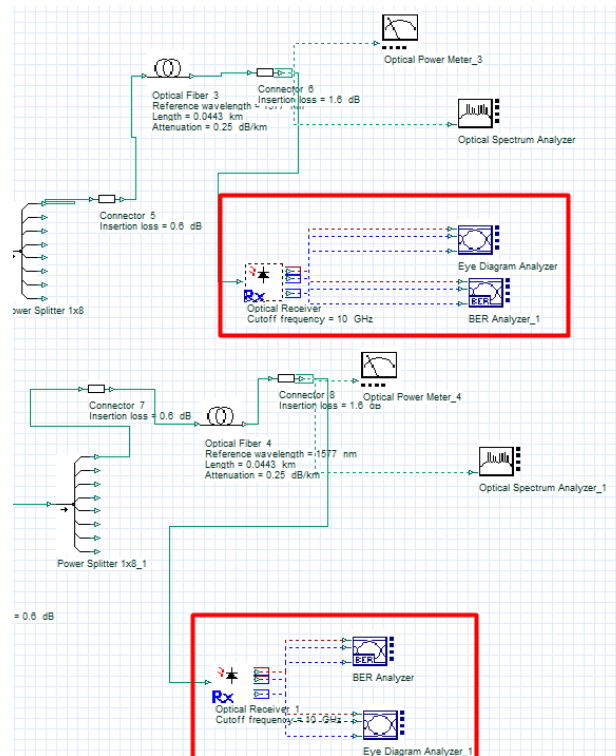


**e) Parámetros de la red de acceso**

En la etapa final de la red de acceso representada en la Figura 17, la señal óptica es propagada a través de un tramo adicional de fibra óptica monomodo, cuya configuración mantiene los mismos parámetros definidos en secciones anteriores, específicamente una longitud de onda de referencia de 1577 nm y un coeficiente de atenuación de 0,25 dB/km, variando únicamente la longitud del enlace para representar la distancia entre el último nivel de splitteo y el usuario final. En esta sección se incorporan conectores ópticos con pérdidas de inserción típicas, así como medidores de potencia óptica y analizadores de espectro, los cuales permiten monitorear el nivel de potencia recibida y verificar la correcta ocupación espectral del canal descendente en el extremo de la red.

**Figura 17**

*Esquema y parámetros de los elementos de la red de acceso óptica*

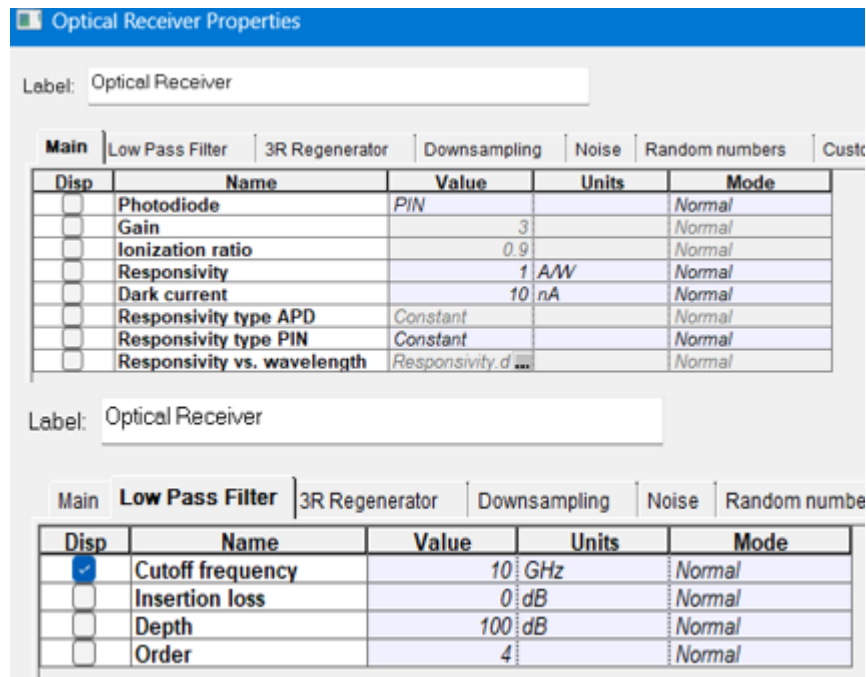


### *f) Parámetros del receptor óptico*

El receptor óptico que posee los parámetros de configuración en base a la información de la Figura 18 simula el funcionamiento de la Optical Network Terminal (ONT), empleando un fotodiodo tipo PIN como elemento de detección y estableciendo una responsividad<sup>1</sup> de 1 A/W, junto con una ganancia eléctrica de 3, valores representativos de receptores ópticos utilizados en redes de acceso. Adicionalmente, el receptor incorpora un filtro paso bajo con una frecuencia de corte de 10 GHz, que es adecuado para una señal con tasa de bits de 10 Gb/s, lo que permite limitar el ruido fuera de banda y mejorar la calidad de la señal detectada.

<sup>1</sup> Responsividad: Se define en un fotodiodo como un parámetro que indica la eficiencia con la que el dispositivo convierte la potencia óptica incidente en corriente eléctrica y se define como la relación entre la corriente generada en el fotodiodo y la potencia óptica recibida, expresada en amperios por watt (A/W).

**Figura 18**  
*Parámetros de configuración del receptor óptico*



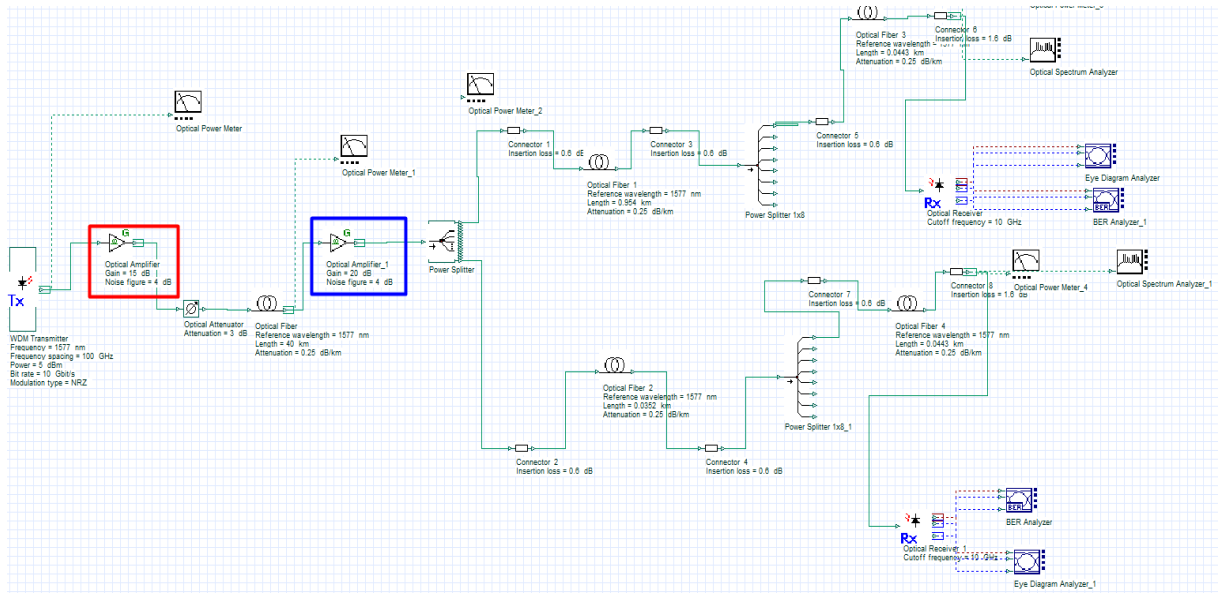
Finalmente, la señal eléctrica recuperada es evaluada mediante analizadores de diagrama de ojo y tasa de error de bit (BER), con el fin de caracterizar el desempeño del sistema XGS-PON desde la perspectiva del usuario final, como se muestra en el rectángulo de color rojo en la Figura 17.

### 3.7.2 Escenario 2: División de señal

El segundo escenario del testbed se plantea como una extensión del primer escenario, manteniendo sin modificaciones los parámetros de configuración del ambiente de simulación de sus cinco componentes correspondientes al transmisor WDM, la fibra óptica, la red de distribución, la red de acceso y el receptor óptico, los cuales se describen en la sección 3.7.1. Esta decisión metodológica permite aislar el impacto del arreglo de amplificación óptica, garantizando que las variaciones observadas en el desempeño del sistema se deban exclusivamente a los cambios introducidos en la etapa de amplificación.

La diferencia fundamental de este escenario radica en la incorporación de un esquema de amplificación distribuida, conformado por dos amplificadores ópticos EDFA, tal como se muestra en los recuadros rojo y azul de la Figura 19.

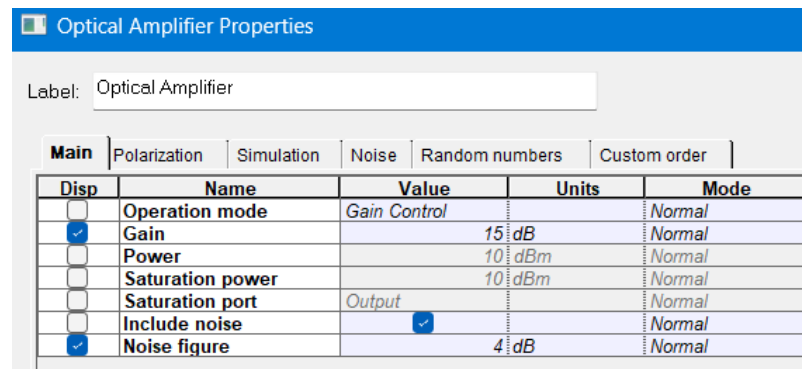
**Figura 19**  
*Arreglo de amplificadores del segundo escenario*



### a) Primer amplificador EDFA

El primer amplificador (recuadro rojo), ubicado en el extremo de transmisión asociado a la OLT, es configurado en modo de control de ganancia con un valor de 15 dB, como se muestra en la Figura 20, lo que le permite al amplificador con ese valor de ganancia compensar de manera controlada las pérdidas iniciales introducidas por los elementos pasivos cercanos a la OLT, así como mejorar el nivel de potencia de inyección hacia el enlace de fibra óptica, sin forzar al amplificador a operar en régimen de saturación. La elección de una ganancia moderada en esta etapa responde a la necesidad de preservar la calidad espectral de la señal y minimizar la acumulación temprana de ruido de emisión espontánea amplificada (ASE), manteniendo una relación señal-ruido adecuada en las etapas posteriores del sistema.

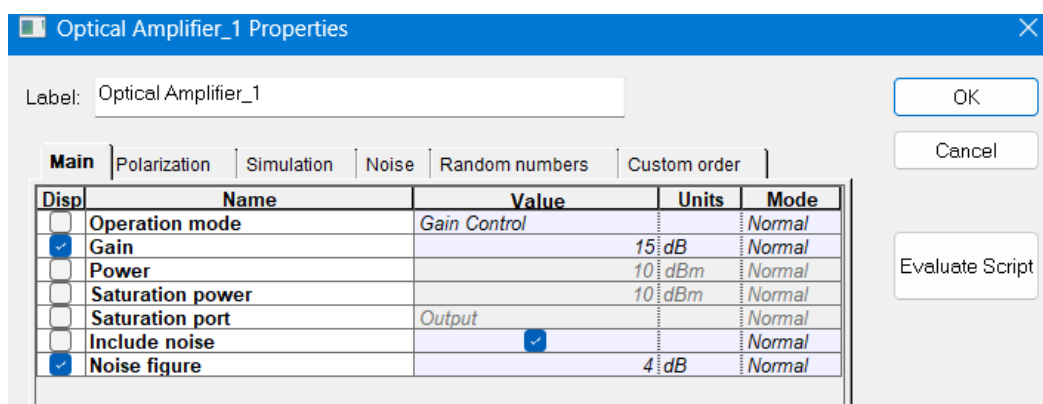
**Figura 20**  
*Parámetros de configuración del primer amplificador*



**b) Segundo amplificador EDFA**

El segundo amplificador óptico, ubicado después del tramo principal de 40 km de la fibra monomodo, posee los parámetros identificados en la Figura 21, en los cuales se establece una ganancia mayor de 15 dB, lo que conlleva a que este amplificador tiene como finalidad recuperar el nivel de potencia antes de la red de distribución pasiva, donde se producen pérdidas considerables debido al alto grado de división; de este modo, al ubicar la segunda ganancia en esta etapa intermedia del enlace, se logra contrarrestar la atenuación acumulada generada durante la transmisión del enlace de fibra inicial.

**Figura 21**  
*Parámetros de configuración del primer amplificador*

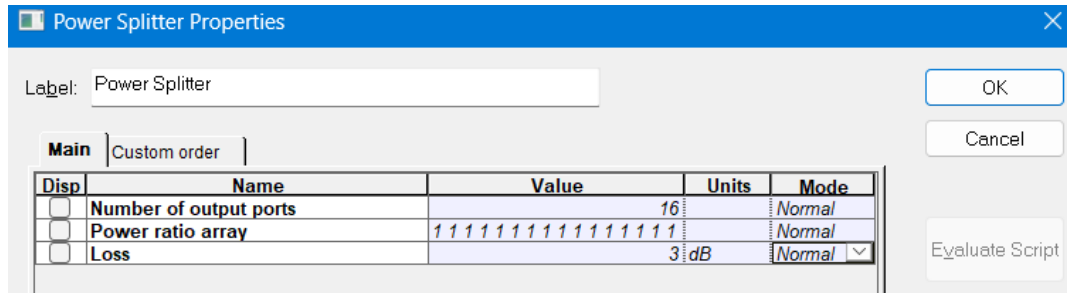


Las configuraciones del splitter de este escenario se presentan en la Figura 22, que corresponde a un divisor óptico pasivo de 16 puertos de salida, lo que permite establecer un esquema de splitteo 1×16. No obstante, es necesario recalcar que el software establece una

pérdida de potencia de 13 dB, por lo que es necesario añadir una pérdida adicional de 3 dB para cumplir con el requisito de pérdida de 15 dB.

**Figura 22**

*Parámetros de configuración del splitter*



### 3.7.3 Escenario 3: Coexistencia tecnológica

En el tercer escenario de evaluación, orientado al análisis de coexistencia tecnológica, se implementa la transmisión simultánea de señales correspondientes a XG-PON y XGS-PON sobre una misma red de distribución óptica. Para ello, se emplean dos transmisores WDM que simulan el comportamiento de la OLT para cada tecnología, manteniendo el resto de los parámetros del sistema ambiente de simulación y red de distribución conforme a la configuración descrita en los escenarios anteriores.

#### a) Transmisor XG-PON

El primer transmisor WDM representa el comportamiento del canal downstream de la tecnología XG-PON, conforme a los lineamientos establecidos para redes PON de acceso. La Figura 23 presenta los parámetros de este transmisor, en el cual se define una longitud de onda central de 1490 nm, correspondiente al canal descendente utilizado tradicionalmente por XG-PON para transmisión de datos, garantizando la correcta separación espectral respecto al canal y permitiendo la coexistencia de ambas tecnologías sobre una misma red de distribución óptica.

Asimismo, se estableció una tasa de transmisión de 2,5 Gb/s, valor representativo del canal downstream de XG-PON, junto con una modulación NRZ, la cual es utilizada en sistemas PON. Los valores de la potencia óptica de salida son de 5 dBm, correspondiente a los niveles

típicos de transmisión en la OLT, mientras que una relación de extinción de 10 dB asegura una adecuada diferenciación entre los niveles lógicos de la señal modulada, contribuyendo a una correcta detección en el receptor.

Además, el espaciado espectral es definido a 100 GHz, lo cual facilita el modelado de un entorno de coexistencia realista al minimizar la interferencia entre canales adyacentes cuando se emplea la multiplexación por división de longitud de onda. Al mismo tiempo, al mantener la fase inicial en  $0^\circ$ , se simplifica el análisis del sistema sin que ello tenga un impacto significativo en los resultados de rendimiento.

**Figura 23**

*Configuración del transmisor XG-PON*

Disp	Name	Value	Units	Mode
<input type="checkbox"/>	Number of output ports	1		Normal
<input checked="" type="checkbox"/>	Frequency	1490	nm	Normal
<input checked="" type="checkbox"/>	Frequency spacing	100	GHz	Normal
<input checked="" type="checkbox"/>	Power	5	dBm	Normal
<input type="checkbox"/>	Extinction ratio	10	dB	Normal
<input type="checkbox"/>	Linewidth	10	MHz	Normal
<input type="checkbox"/>	Initial phase	0	deg	Normal

Disp	Name	Value	Units	Mode
<input checked="" type="checkbox"/>	Bit rate	2.5	Gbit/s	Normal
<input type="checkbox"/>	Order	log(Sequence len)	5	Script
<input type="checkbox"/>	Number of leading zeros	1		Normal
<input type="checkbox"/>	Number of trailing zeros	1		Normal

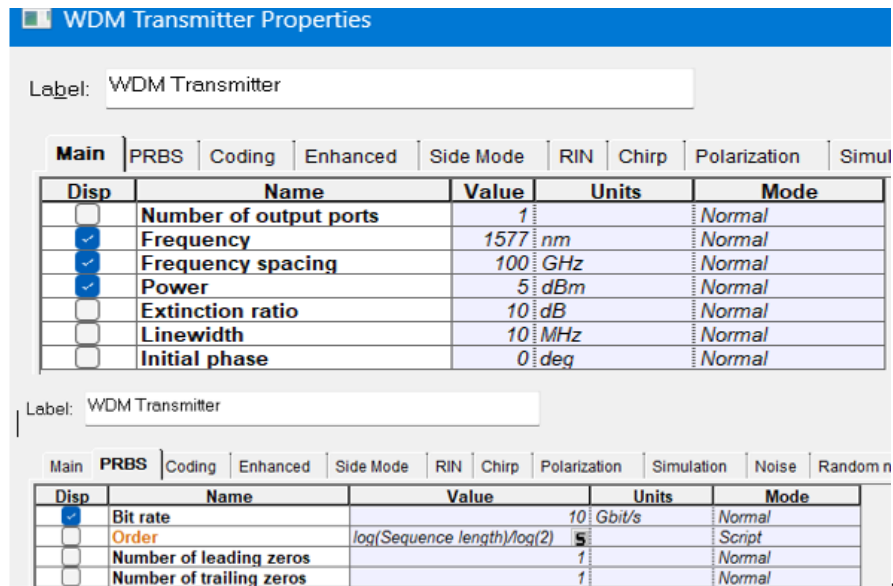
### ***b) Transmisor XGS-PON***

Los parámetros de configuración del transmisor XGS-PON, presentados en la Figura 24, permiten modelar el comportamiento del canal descendente de esta tecnología para transmisión de datos, en el cual establece un único puerto de salida, operando a una longitud de onda central de 1577 nm, correspondiente al canal downstream. Asimismo, establece un espaciado espectral de 100 GHz, asegurando una separación adecuada entre canales y evitando posibles interferencias en escenarios de multiplexación por longitud de onda, para finalmente

fijar la potencia óptica de salida en 5 dBm, valor representativo de los niveles típicos de transmisión en la OLT, mientras que la velocidad de transmisión se configura en 10 Gb/s, en concordancia con las especificaciones de XGS-PON.

**Figura 24**

*Parámetros de configuración del transmisor XGS-PON*



### ***c) Multiplexor WDM 2x1***

El multiplexor WDM 2×1 es configurado para integrar las dos señales ópticas correspondientes a XG-PON y XGS-PON, permitiendo su transmisión conjunta sobre un mismo enlace de fibra óptica, para ello se definieron dos canales de operación a 1490 nm y 1577 nm, longitudes de onda asignadas a los canales descendentes de ambas tecnologías.

Además, se establece un ancho de banda de 10 GHz y una profundidad de filtrado de 100 dB, lo que garantiza una adecuada selectividad espectral y una alta atenuación de señales fuera de banda, minimizando posibles interferencias entre canales para finalmente configurar un filtro de tipo Bessel de segundo orden, el cual permite preservar la forma temporal de la señal y reducir la distorsión introducida por el proceso de multiplexación, asegurando así una coexistencia estable y eficiente dentro de la red de distribución óptica, de modo que todas estas configuraciones están presentadas en la Figura 25.

**Figura 25**  
Parámetros de configuración del transmisor XG-PON

WDM Mux 2x1 Properties

Label: WDM Mux 2x1

Main Channels Ripple Simulation Noise Custom order

Disp	Name	Value	Units	Mode
<input type="checkbox"/>	Bandwidth	10	GHz	Normal
<input type="checkbox"/>	Insertion loss	0	dB	Normal
<input type="checkbox"/>	Depth	100	dB	Normal
<input type="checkbox"/>	Filter type	Bessel		Normal
<input type="checkbox"/>	Filter order	2		Normal

Label: WDM Mux 2x1

Main Channels Ripple Simulation Noise Custom order

Disp	Name	Value	Units	Mode
<input checked="" type="checkbox"/>	Frequency[0]	1490	nm	Normal
<input checked="" type="checkbox"/>	Frequency[1]	1577	nm	Normal

#### d) Parámetros de la fibra óptica

La configuración del enlace de fibra óptica monomodo se definió de manera que permita la operación simultánea de las tecnologías XG-PON y XGS-PON, sin introducir condiciones restrictivas ni sesgos en favor de alguno de los sistemas. En este contexto, la Figura 26 presenta los parámetros de configuración de la fibra óptica utilizados a lo largo de toda la red, donde se estableció una longitud de onda de referencia de 1577 nm, correspondiente al canal descendente de XGS-PON; sin embargo, al emplear un modelo de atenuación constante, con un coeficiente de 0,25 dB/km, se garantiza un comportamiento representativo de la fibra monomodo en la banda de 1490–1600 nm, intervalo espectral en el cual operan ambas bandas.

**Figura 26**  
Parámetros de configuración de la fibra óptica para XG-PON y XGS-PON

Optical Fiber Properties

Label: Optical Fiber

Main Dispersion PMD Nonlinearities Numerical Graphs Simulation Noise Random numbers

Disp	Name	Value	Units	Mode
<input type="checkbox"/>	User defined reference wavelengt	<input checked="" type="checkbox"/>		Normal
<input checked="" type="checkbox"/>	Reference wavelength	1577	nm	Normal
<input checked="" type="checkbox"/>	Length	3	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	0.25	dB/km	Normal
<input type="checkbox"/>	Attenuation vs. wavelength	Attenuation.dat		Normal

Adicionalmente, cabe recalcar que esta configuración de la fibra óptica se mantiene constante tanto en la red de distribución como en la red de acceso, variando únicamente la longitud de los tramos con el fin de representar de manera realista las distancias entre los diferentes nodos de la red y los usuarios finales. Finalmente, la arquitectura considera un esquema de doble nivel de splitteo, conformado por un primer divisor  $1 \times 4$  y un segundo divisor  $1 \times 8$ , lo cual permite modelar una topología PON jerárquica representativa de despliegues reales y evaluar el impacto conjunto de la distancia y la división pasiva de la señal sobre el desempeño del sistema.

## Capítulo IV: Pruebas de Funcionamiento

Esta sección presenta el análisis de resultados obtenidos a partir de la evaluación de los escenarios del testbed, el cual tiene como propósito caracterizar el desempeño de la red XGS-PON bajo distintos escenarios de operación, de modo que este apartado examina métricas fundamentales como la potencia óptica, la relación señal-ruido óptica (OSNR), la tasa de error de bit (BER) y el comportamiento espectral de la señal, los cuales permiten valorar de forma integral la calidad de la transmisión a lo largo del enlace. Dichas métricas son analizadas tanto de manera general como de forma específica para cada escenario de evaluación con el fin de identificar el impacto de la distancia, el nivel de splitteo y la coexistencia espectral sobre el sistema.

### 4.1. Métricas de evaluación de los escenarios

Las métricas de evaluación de los escenarios son aplicadas de manera general a cada uno con el objetivo de identificar el desempeño del sistema PON bajo diferentes condiciones de operación, lo que conlleva que la selección de estas métricas responda a los criterios técnicos establecidos por la ITU en sus secciones G.987 y G.9807.1 para redes de acceso ópticas, permitiendo contrastar los resultados obtenidos en la simulación con los valores de referencia aceptados para tecnologías GPON y XGS-PON.

En este contexto, el análisis se centra en parámetros asociados al nivel de potencia óptica, la relación señal-ruido óptica (OSNR), la tasa de error de bit (BER) y el espectro de la señal, los cuales en conjunto permiten evaluar la calidad de transmisión y la viabilidad técnica de las configuraciones propuestas.

#### 4.1.1. Potencia de la señal

Este parámetro permite verificar los niveles de potencia óptica en los tramos finales del sistema, ya que permite asegurar que la señal recibida en la ONT se mantenga dentro de rangos que garanticen su detección sin saturación ni degradación excesiva. De modo que, esta métrica

analiza en distintos puntos del enlace, como la salida del transmisor, en la red de distribución y en el receptor final, lo que conlleva a que las recomendaciones ITU para redes PON, los niveles de potencia deben compararse con los valores indicados en la Tabla 9.

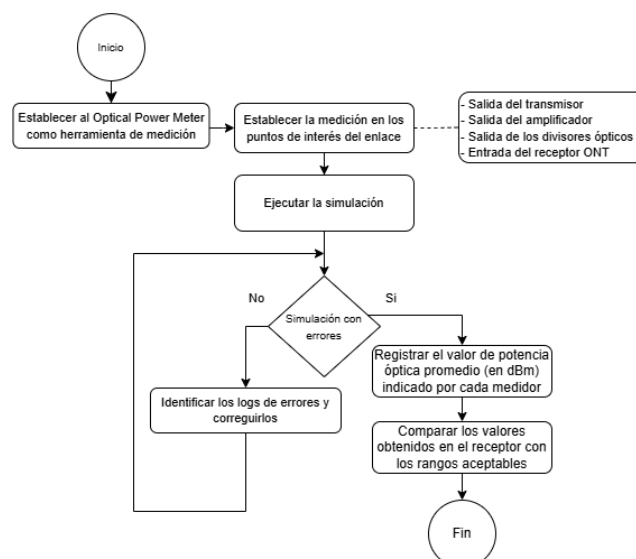
**Tabla 9**  
*Valores de referencia para potencia óptica en PON*

Tecnología	Potencia recibida en ONT	Referencia ITU
GPON	-28 a -30 dBm	ITU-T G.984
XG-PON	-28 a -31 dBm	ITU-T G.987
XGS-PON	-29 a -32 dBm	ITU-T G.9807.1

El proceso de recopilación de los datos de esta métrica se presenta en la Figura 27, en el cual el algoritmo comienza definiendo al Optical Power Meter como herramienta de medición y establecer los puntos de interés del enlace donde se evaluará la potencia óptica. A continuación, se ejecuta la simulación y se verifica su correcta ejecución; en caso de errores, estos son identificados y corregidos antes de continuar.

Una vez validada la simulación, se registran los valores promedio de potencia óptica indicados por cada medidor y, finalmente, los resultados obtenidos en el receptor son comparados con los rangos aceptables establecidos, concluyendo así el proceso de evaluación.

**Figura 27**  
*Algoritmo de medición de potencia óptica*



#### 4.1.2. Relación señal-ruido óptica

La relación señal-ruido permite cuantificar la calidad de la señal óptica en presencia del ruido generado a lo largo del enlace, lo que puede limitar el desempeño del sistema. Para la evaluación de los escenarios, los valores obtenidos se comparan con los umbrales de referencia presentados en la Tabla 10.

**Tabla 10**  
*Valores de referencia para OSNR*

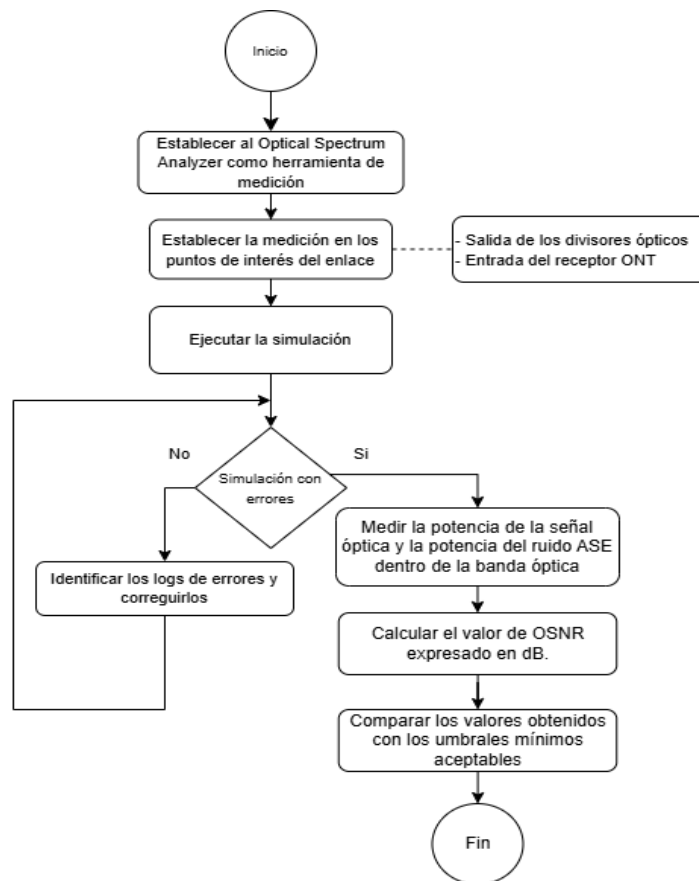
Condición de operación	OSNR mínimo aceptable	Referencia ITU
Enlace sin amplificación	> 25 dB	ITU-T G.959.1 / G.698.2
Enlace con amplificación	> 20 dB	ITU-T G.959.1 / G.872
Coexistencia tecnológica WDM	> 20 dB por canal	ITU-T G.698.2 / G.872

*Nota. Los valores de referencia utilizados en este trabajo se fundamentan en las recomendaciones ITU para sistemas ópticos amplificados (G.959.1) y WDM (G.698.2), las cuales definen umbrales de OSNR necesarios para garantizar niveles de BER aceptables.*

El procedimiento para la obtención de la relación señal-ruido óptica se ilustra en la Figura 28, en el cual el algoritmo inicia con la selección del Optical Spectrum Analyzer como instrumento de medición, a partir de lo cual se definen los puntos relevantes del enlace, particularmente a la salida de los divisores ópticos y en la entrada del receptor que simula la ONT. Posteriormente, se ejecuta la simulación y se comprueba su correcta finalización; en caso de presentarse errores, estos son identificados y corregidos antes de continuar con el análisis.

Una vez validada la simulación, la potencia de la señal óptica y la potencia del ruido ASE es medida dentro de la banda espectral de interés, permitiendo el cálculo del valor de OSNR expresado en decibelios. Finalmente, los valores obtenidos son comparados con los umbrales mínimos aceptables establecidos, lo que permite evaluar la calidad del enlace y concluir el proceso de análisis de esta métrica.

**Figura 28**  
*Algoritmo de medición de OSNR*



#### 4.1.3. Tasa de error de bits

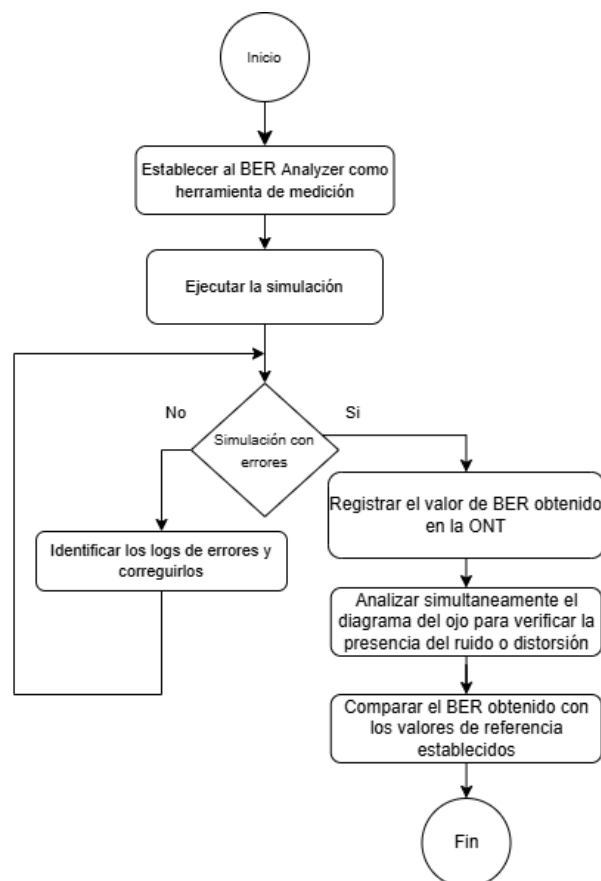
La tasa de error de bits mide la probabilidad de error en la recepción de la información transmitida y constituye uno de los indicadores más directos de la calidad del enlace, lo que le permite a esta métrica reflejar el impacto conjunto de la atenuación, el ruido, la dispersión y el nivel de splitteo sobre la transmisión. Por ende, los valores de BER obtenidos deben compararse con los límites establecidos para cada tecnología, los cuales se resumen en la Tabla 11.

**Tabla 11**  
*Valores de referencia para BER*

Tecnología	BER máximo permitido
GPON	$\leq 1 \times 10^{-9}$
XG-PON	$\leq 1 \times 10^{-10}$
XGS-PON	$\leq 1 \times 10^{-12}$

El proceso para la evaluación de la tasa de error de bits se muestra en la Figura 29, en la cual el algoritmo inicia con la definición del BER Analyzer como herramienta de medición, seguido de la ejecución de la simulación bajo las condiciones previamente establecidas. Una vez que la simulación no presenta errores, el siguiente paso corresponde al registro del valor de BER obtenido en el receptor que simula la ONT, el cual es analizado de manera conjunta con el diagrama de ojo, permitiendo identificar la presencia de ruido, distorsión o degradación de la señal. Concluyendo en que el valor de BER calculado sea comparado con los valores de referencia establecidos, lo que permite determinar el cumplimiento de los requisitos de calidad del sistema y concluir el proceso de evaluación de esta métrica.

**Figura 29**  
*Algoritmo de medición del BER*



#### 4.1.4. Espectro de la señal óptica

El análisis del espectro permite verificar la ocupación espectral de la señal y detectar la presencia de interferencias, ruido fuera de banda o distorsiones introducidas por los elementos activos y pasivos del sistema. Además, esta métrica permite identificar los escenarios de coexistencia tecnológica, donde múltiples canales comparten la misma red de distribución óptica, de modo que la información alojada en la Tabla 12 permite la evaluación espectral en los escenarios del testbed.

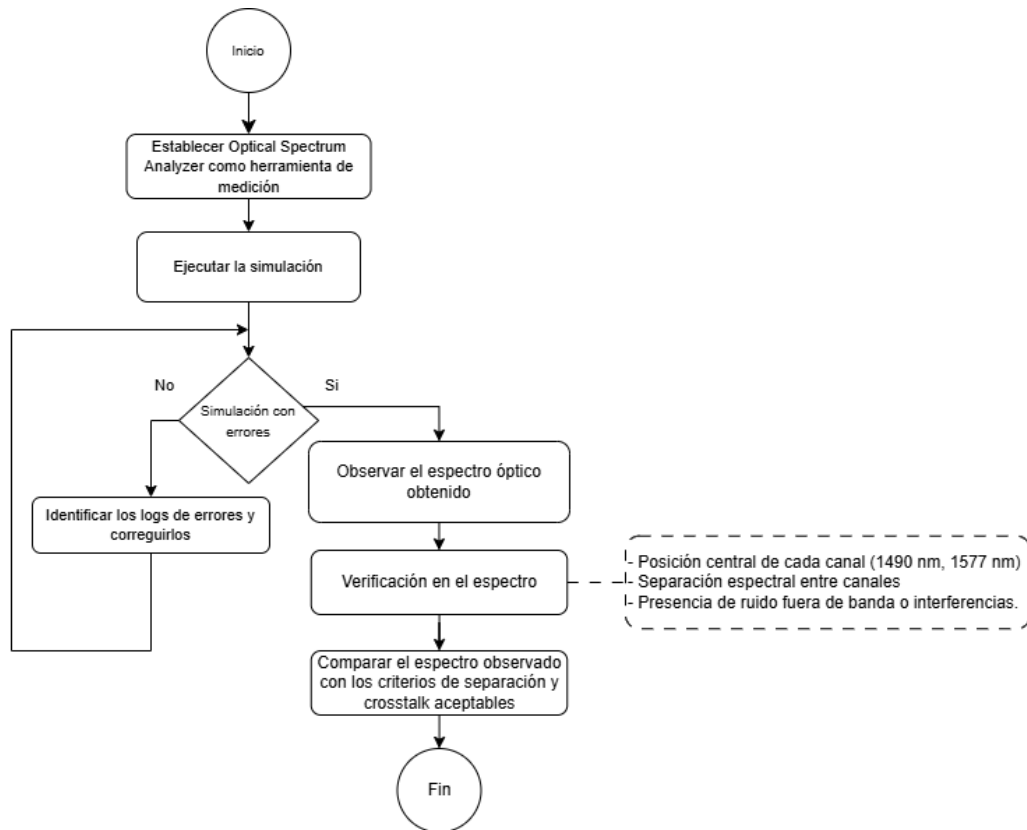
**Tabla 12**  
*Criterios de evaluación espectral*

<b>Tecnología</b>	<b>Valor de referencia</b>
Separación entre canales	$\geq 100$ GHz
Crosstalk entre canales	$< -40$ dB
Estabilidad del pico espectral	$\pm 0,1$ nm

El procedimiento para el análisis del espectro óptico se describe en la Figura 30, en el cual algoritmo inicia con la selección del Optical Spectrum Analyzer como instrumento de observación espectral, seguido de la ejecución de la simulación. El siguiente paso corresponde en verificar la correcta ejecución del proceso y, en caso de detectarse inconsistencias, estas sean identificadas y corregidas antes de continuar con el análisis.

Posteriormente, es necesario verificar la posición central de cada canal, la separación espectral entre longitudes de onda y la presencia de componentes no deseadas, como ruido fuera de banda o interferencias.

**Figura 30**  
*Algoritmo de medición del espectro de la señal óptica*



## 4.2. Monitoreo de métricas de desempeño

Una vez definidos los escenarios de simulación y establecidos los algoritmos de medición para cada métrica, esta sección se centra en el monitoreo y análisis de los resultados obtenidos a partir de las simulaciones realizadas en OptiSystem. El objetivo es evaluar el comportamiento del sistema XGS-PON bajo las condiciones planteadas en los escenarios, de modo que a través de este análisis permite contrastar los valores obtenidos con los rangos de referencia establecidos en las recomendaciones de la ITU-T, permitiendo una interpretación técnica del desempeño del enlace y la validación de su operación en cada uno de los escenarios evaluados.

### 4.2.1. Escenario 1: Distancia Máxima

El primer escenario del testbed correspondiente a la evaluación de distancia máxima, el cual permite el análisis del desempeño del sistema XGS-PON, al representar una condición

de operación cercana al límite del alcance del enlace óptico, de modo que en este escenario el análisis de las métricas se orienta en identificar el impacto de la atenuación acumulada del enlace, el nivel de splitteo y la amplificación óptica sobre la calidad de la señal recibida.

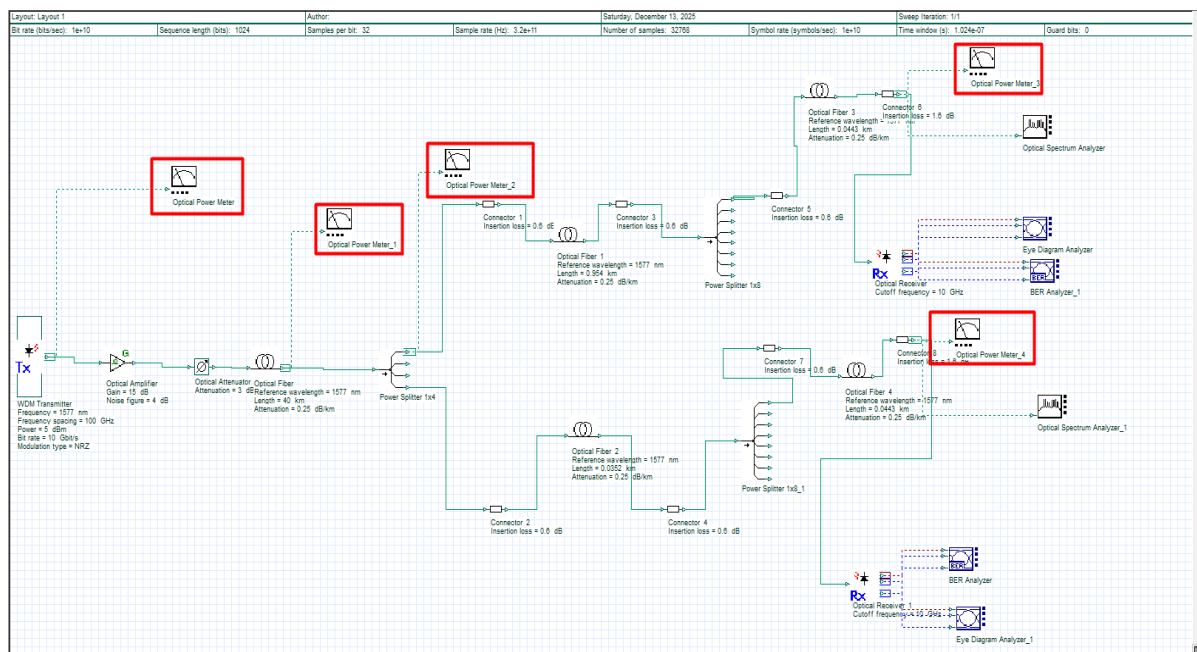
#### 4.2.1.1. Potencia de la señal

El análisis de la potencia de la señal óptica se lleva a cabo siguiendo el procedimiento descrito en el algoritmo presentado en la Figura 27, el cual establece una metodología sistemática para la obtención de esta métrica a lo largo del enlace. En primer lugar, la selección de la herramienta Optical Power Meter permite medir los niveles de potencia óptica en los distintos tramos de la red, considerando desde la salida del transmisor, pasando por los elementos de amplificación, los niveles de splitteo y el despliegue longitudinal de la red, hasta alcanzar el receptor que simula a los usuarios finales.

La Figura 31 mediante los recuadros resaltados en color rojo, muestra la ubicación de los puntos de medición implementados en el escenario, los cuales permiten monitorear la evolución de la potencia óptica y verificar que los valores obtenidos se mantengan dentro de los rangos aceptables establecidos bajo las condiciones de distancia máxima evaluadas.

**Figura 31**

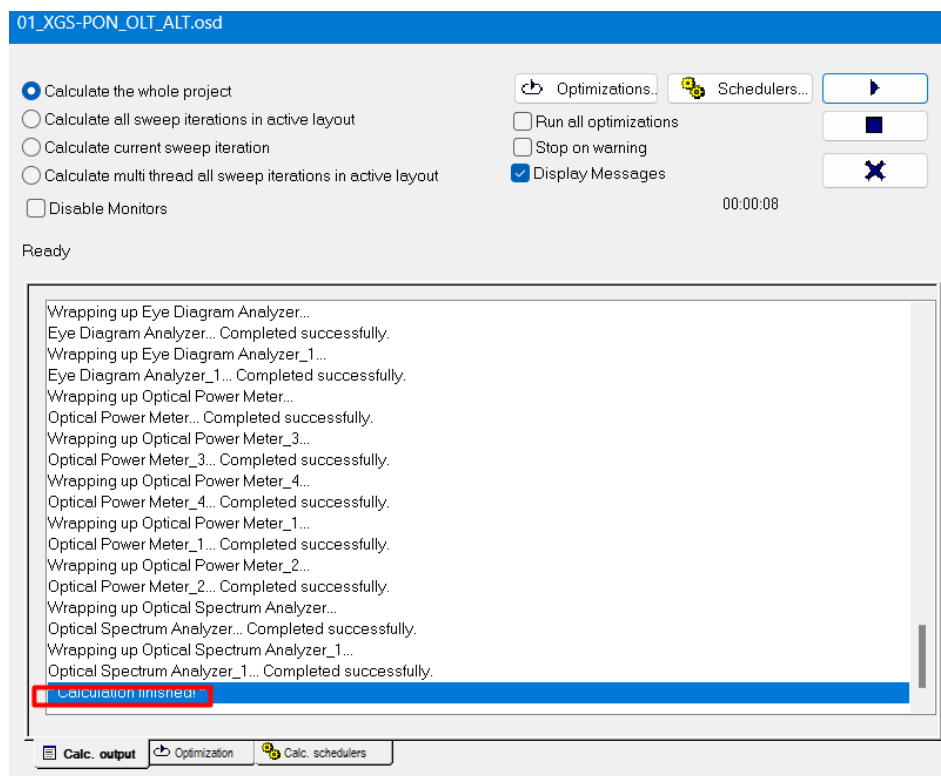
*Puntos de medición de potencia óptica en el enlace del primer escenario*



El siguiente paso consiste en ejecutar la simulación y verificar que su desarrollo se complete correctamente, confirmando la ausencia de errores tanto en el proceso de cálculo como en los resultados generados, de este modo, el software indica que todas las operaciones han sido realizadas de manera satisfactoria. La Figura 32 muestra el resultado obtenido una vez que la simulación ha sido completada correctamente, evidenciando la correcta ejecución del modelo bajo las condiciones establecidas.

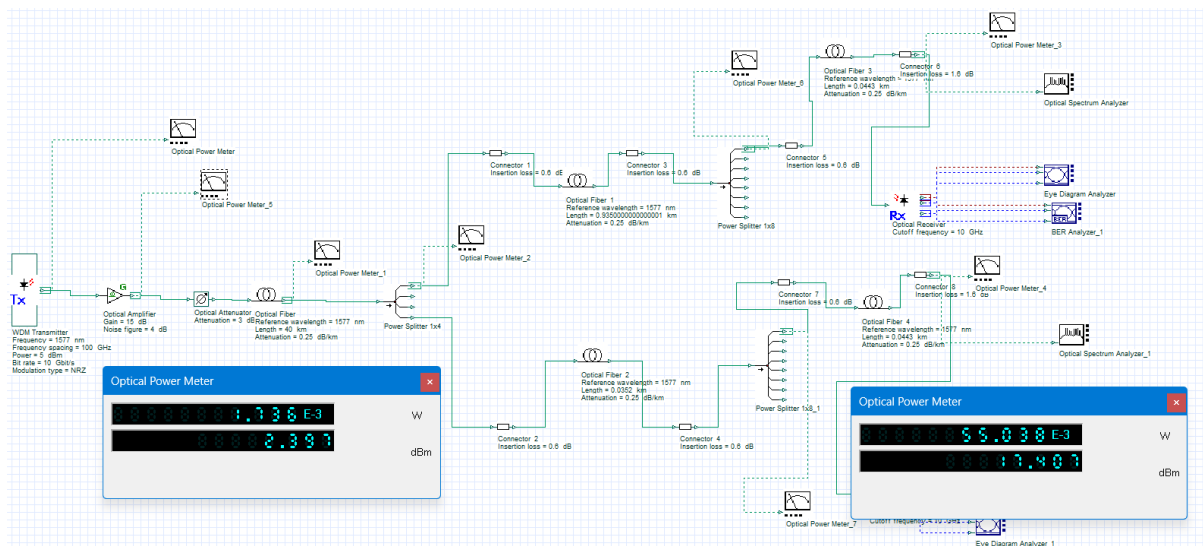
### Figura 32

*Resultado de simulación sin presencia de errores en Optisystem*



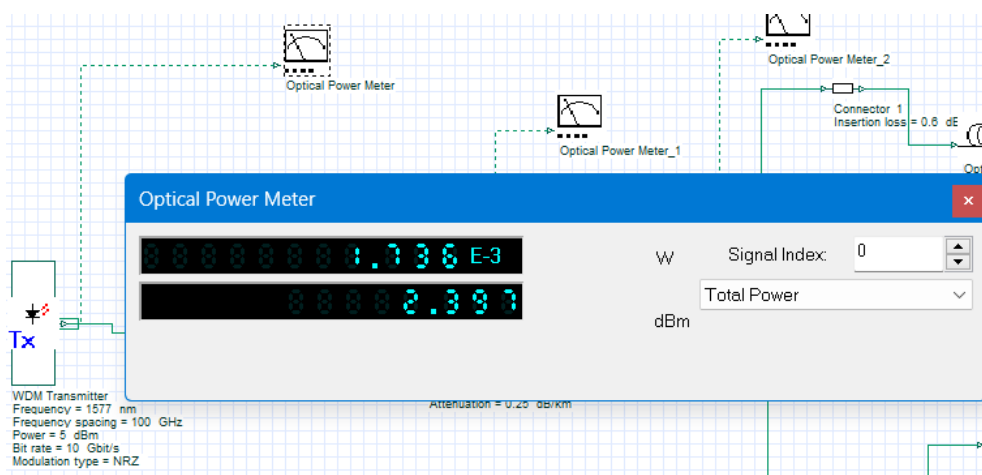
Una vez la simulación ha terminado, el siguiente proceso corresponde en seleccionar e identificar los niveles de potencia alojados en cada uno de los instrumentos de medición, como se muestra en la Figura 33 .

**Figura 33**  
Medición de los niveles de potencia óptica



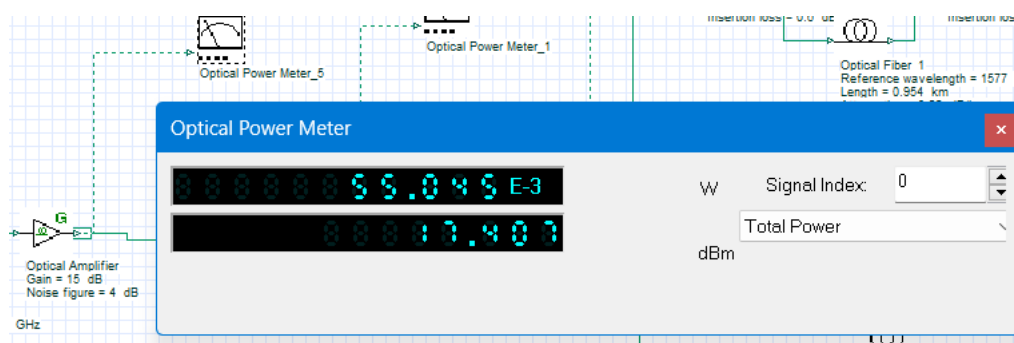
La primera medición corresponde a la salida del transmisor WDM, como se presenta en la Figura 34, donde se registra un nivel de potencia óptica de 2,397 dBm. Este valor corresponde a la potencia óptica efectiva disponible en el punto de medición, considerando las pérdidas introducidas por los elementos internos del transmisor debido al coeficiente de extinción correspondiente al tipo de modulación NRZ, de modo que el cálculo de esta atenuación generada se presenta a detalle en el Anexo 2, por ende, la potencia medida no corresponde únicamente al valor nominal configurado en el transmisor, sino a la potencia real inyectada hacia la red de distribución óptica.

**Figura 34**  
Potencia inicial en el transmisor WDM



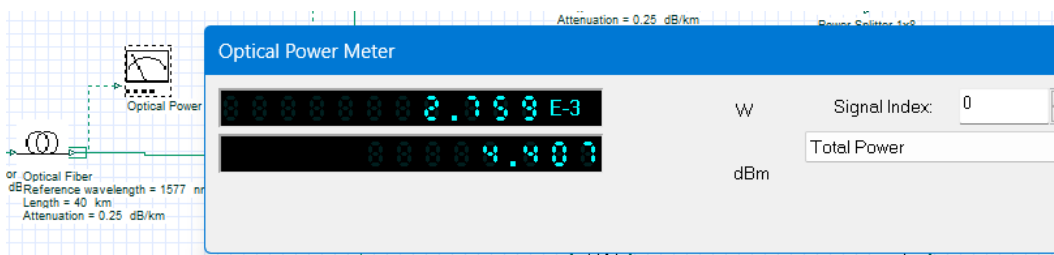
Posteriormente, la medición realizada a la salida del amplificador óptico EDFA, presentada en la Figura 35, muestra un incremento del nivel de potencia óptica hasta 17,407 dBm. Este aumento evidencia el efecto de la ganancia aplicada por el amplificador, cuya función principal es asegurar un margen suficiente de potencia para soportar la propagación a larga distancia y los posteriores niveles de división de la señal, contribuyendo a la estabilidad y desempeño del sistema.

**Figura 35**  
*Potencia a la salida del amplificador EDFA*



Al final del enlace de 40 km de fibra óptica, la medición realizada al final del enlace de 40 km de fibra óptica evidencia una disminución del nivel de potencia hasta 6,901 dBm, como se muestra en la Figura 36. Esta reducción es consecuencia directa de la atenuación introducida por la fibra monomodo a lo largo de un tramo de transmisión extenso, cuyo coeficiente de pérdida acumulada impacta progresivamente sobre la señal óptica.

**Figura 36**  
*Potencia al final del enlace de 40 km*



A continuación, tras el primer nivel de splitteo 1×4, la medición muestra una reducción del nivel de potencia en -4,614 dBm, lo que conlleva a que este registro se atribuya a las

pérdidas del proceso de splitteo, donde la potencia óptica de la señal es distribuida de manera equitativa entre las salidas del divisor, generando una disminución significativa del nivel de potencia disponible en cada salida, como se muestra en la medición de la Figura 37.

**Figura 37**  
*Potencia en salidas del splitter 1x4*

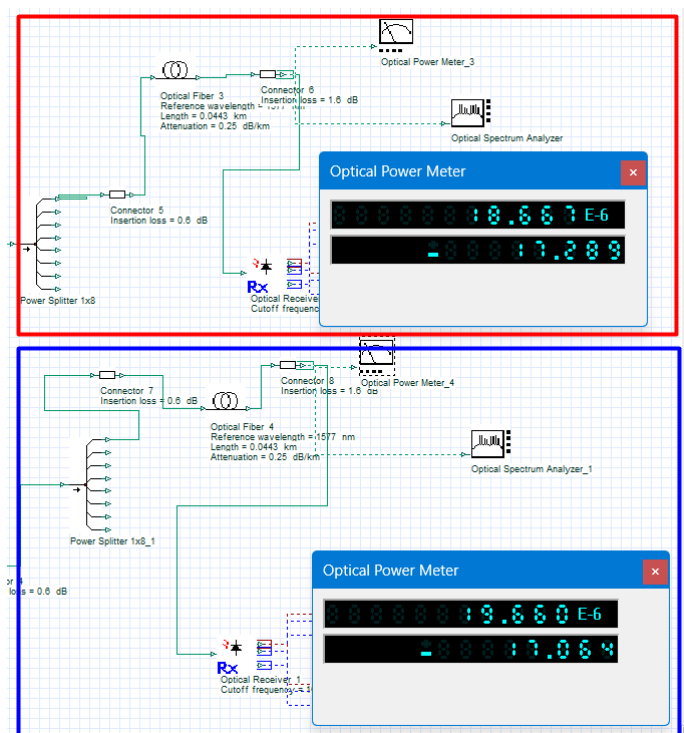


De manera complementaria, en la red de acceso se consideran dos condiciones de operación que permiten evaluar el comportamiento del sistema en función de la distancia entre la red de distribución, la red de acceso y los usuarios finales. Tal como se ilustra en la Figura 38, en la cual el recuadro de color rojo corresponde al escenario más lejano de un usuario, el cual se encuentra ubicado a una distancia de 975 m desde el divisor óptico de primer nivel. En este punto, la medición realizada mediante el Power Meter registra un nivel de potencia de  $-17,289$  dBm, valor que refleja el efecto combinado de las pérdidas introducidas por el splitteo de segundo nivel 1x8, la atenuación del tramo de fibra óptica de distribución, acceso y las pérdidas asociadas a conectores o fusiones.

De forma análoga, el recuadro de color azul representa el escenario del usuario más cercano, ubicado a una distancia aproximada de 75 m desde el mismo nivel de división. En este caso, la potencia óptica medida alcanza un valor de  $-17,064$  dBm, ligeramente superior al del usuario más lejano, diferencia atribuible a la menor longitud del tramo de acceso y, por tanto, a una menor atenuación acumulada.

**Figura 38**

*Medición de potencia de acuerdo con la distancia de los usuarios en la red*



La comparación entre ambos puntos de medición permite evidenciar cómo la variación en la distancia dentro de la red de acceso influye directamente en el nivel de potencia óptica recibida, manteniéndose, no obstante, ambos valores dentro de los márgenes operativos aceptables para la tecnología XGS-PON. La Tabla 13 presenta los resultados de las mediciones de potencia óptica obtenidas en los distintos puntos del enlace para el escenario de distancia máxima.

**Tabla 13**

*Registro de niveles de potencia en la red del escenario 1*

Elemento	Medición	Lugar en la red
Optical Power Meter	2.937 dBm	Transmisor WDM
Optical Power Meter 1	17.407 dBm	Salida del amplificador EDFA
Optical Power Meter 2	4.407 dBm	Final del enlace de 40 km
Optical Power Meter 3	-4.614 dBm	Primer splitter 1x4
Optical Power Meter 4	-15.079 dBm	Splitter 1x8 (usuario lejano)
Optical Power Meter 5	-14.853 dBm	Splitter 1x8 (usuario cercano)
Optical Power Meter 6	-17.289 dBm	Usuario más lejano (975m)
Optical Power Meter 7	-17.064 dBm	Usuario más cercano (75m)

Con el objetivo de validar el comportamiento del enlace de fibra óptica desde un enfoque teórico, se realizó el cálculo del nivel de potencia en el receptor, el cual se presenta en el Anexo 4, considerando las pérdidas asociadas a cada uno de los elementos que conforman la red de acceso, tales como tramos de fibra óptica, empalmes, atenuadores y splitters, de modo que este análisis permite estimar el nivel de potencia óptica que llega al equipo del usuario final y verificar si dicho valor se mantiene dentro de los márgenes operativos establecidos para la tecnología XGS-PON.

En este contexto, se presenta el cálculo de las pérdidas totales del enlace correspondiente al usuario más lejano, ubicado a una distancia adicional de 975 m respecto al último punto de distribución. Para este cálculo se consideraron las pérdidas unitarias típicas de cada elemento de la red, así como la longitud total del enlace. Los resultados obtenidos se detallan en la Tabla 14, donde se muestra la contribución individual de cada componente a la pérdida total del sistema y la relación con cada uno de los parámetros de la ecuación (Ec. 18).

**Tabla 14**

*Tabla de pérdidas totales del enlace de fibra óptica del usuario más lejano*

Elemento	Cantidad	Pérdida unitaria	Parámetros
Extinction ratio	1	2.596 dB	$P_{otros}$
Fibra óptica (km)	40 km	0.25 dB/Km	$(L * \alpha)$
Empalmes por fusión	3	0.1 dB	$P_{emp}$
Conectores	2	0.6 dB	$P_{con}$
Atenuador óptico	1	3 dB	$P_{otros}$
Splitter 1x4	1	7 dB	$P_{split}$
Splitter 1x8	1	11 dB	$P_{split}$
Fibra óptica (km)	0.975 km	0.25 dB/Km	$(L * \alpha)$

Reemplazando los valores de la Tabla 14 en la ecuación del cálculo de la potencia total de la (Ec. 18), se obtiene la expresión

$$\begin{aligned}
 P_{total}(dB) &= (L * \alpha) + P_{emp} + P_{con} + P_{split} + P_{otros} \\
 P_{total}(dB) &= (40km * 0.25 \text{ dB/Km}) + (0.975km * 0.25 \text{ dB/Km}) \\
 &\quad + (3 * 0.1 \text{ dB}) + (2 * 0.6 \text{ dB}) + (1 * 7 \text{ dB}) + (1 * 11 \text{ dB}) \quad (\text{Ec. 4}) \\
 &\quad + (2.596 \text{ dB} + 3 \text{ dB}) \\
 P_{total}(dB) &= -35.34 \text{ dB}
 \end{aligned}$$

A partir de las pérdidas totales calculadas en la (Ec. 7) y considerando la potencia de salida de la OLT, así como la ganancia proporcionada por el amplificador EDFA, se estimó el nivel de potencia óptica que llega a la ONT del usuario más lejano. El resultado del presupuesto de potencia teórico se presenta en la Tabla 15, evidenciando que el nivel de potencia recibido se encuentra dentro del rango operativo permitido para garantizar la correcta prestación del servicio.

**Tabla 15**

*Resultado del presupuesto de potencia en la ONT del usuario más lejano*

Concepto	Valor
Potencia de salida OLT	+5 dBm
Ganancia EDFA	+15 dB
Pérdidas totales de la red	-35.34 dB
<b>Potencia estimada en ONT</b>	<b>-15.34 dBm</b>

De manera análoga, se realizó el cálculo del presupuesto de potencia para el usuario cercano, cuya distancia adicional desde el punto de distribución es de 75 m. Si bien la topología de la red y los elementos involucrados se mantienen constantes, la variación en la longitud del tramo final de fibra genera una diferencia en las pérdidas totales del enlace, por ende, la Tabla 16 presenta las pérdidas asociadas a este escenario.

**Tabla 16**

*Tabla de pérdidas totales del enlace de fibra óptica del usuario cercano*

Elemento	Cantidad	Pérdida unitaria	Pérdida total
Extinction ratio	1	-2.596 dB	-2.596 dB

Fibra óptica (km)	40 Km	0.25 dB/Km	-10 dB
Empalmes por fusión	3	0.1 dB	-0.3 dB
Conectores	2	0.6 dB	-1.2 dB
Atenuador óptico	1	3 dB	-3 dB
Splitter 1x4	1	7 dB	-7 dB
Splitter 1x8	1	11 dB	-11 dB
Fibra óptica (km)	0.075 Km	0.25 dB/Km	-0.019 dB
<b>Total</b>			<b>-35.12 dB</b>

Considerando las pérdidas totales obtenidas para el usuario cercano, junto con los parámetros de potencia de transmisión y amplificación del sistema, se determina el nivel de potencia óptica estimado en la ONT correspondiente a este usuario, en los cuales el presupuesto de potencia registrado en la Tabla 17, permite comparar el impacto de la distancia en el nivel de potencia recibida, manteniéndose dentro de los márgenes aceptables para la tecnología XGS-PON.

**Tabla 17**

*Resultado del presupuesto de potencia en la ONT del usuario cercano*

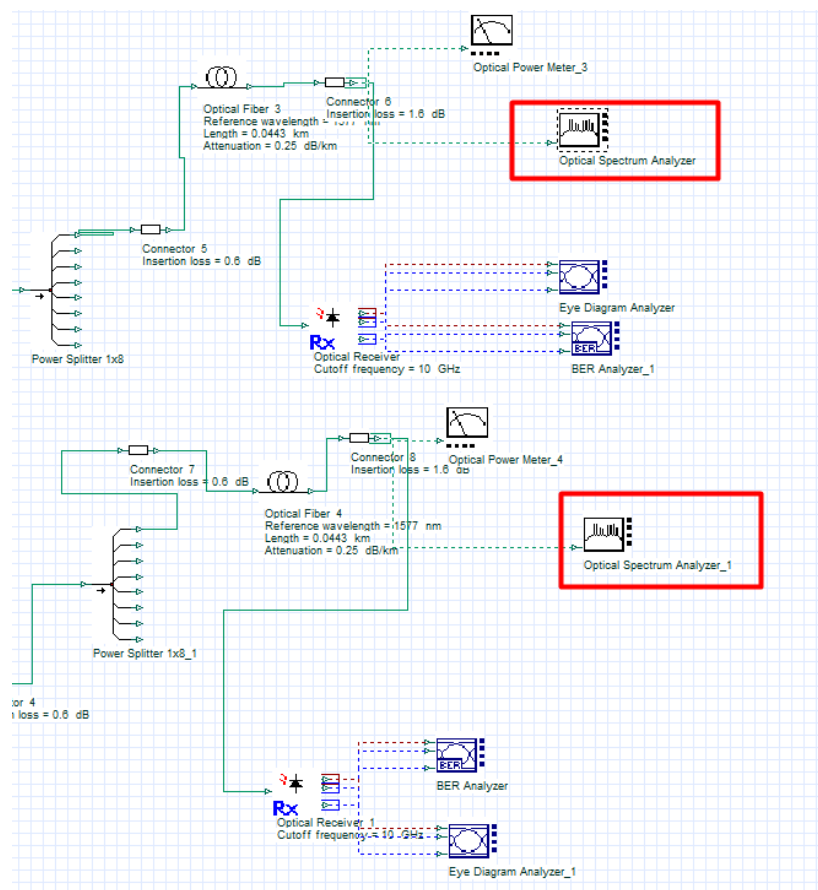
<b>Concepto</b>	<b>Valor</b>
Potencia de salida OLT	+5 dBm
Ganancia EDFA	+15 dB
Pérdidas totales de la red	-35.12 dB
<b>Potencia estimada en ONT</b>	<b>-15.12 dBm</b>

#### **4.2.1.2. Relación señal-ruido**

La evaluación de la relación señal-ruido óptica (OSNR) se desarrolla conforme al procedimiento definido en el algoritmo de la Figura 28, el cual permite caracterizar la calidad de la señal óptica a partir de su comportamiento espectral. Para este análisis, se emplea la herramienta de medición Optical Spectrum Analyzer de Optisystem, con el fin de observar la distribución espectral de la señal y el nivel de ruido presente en el enlace.

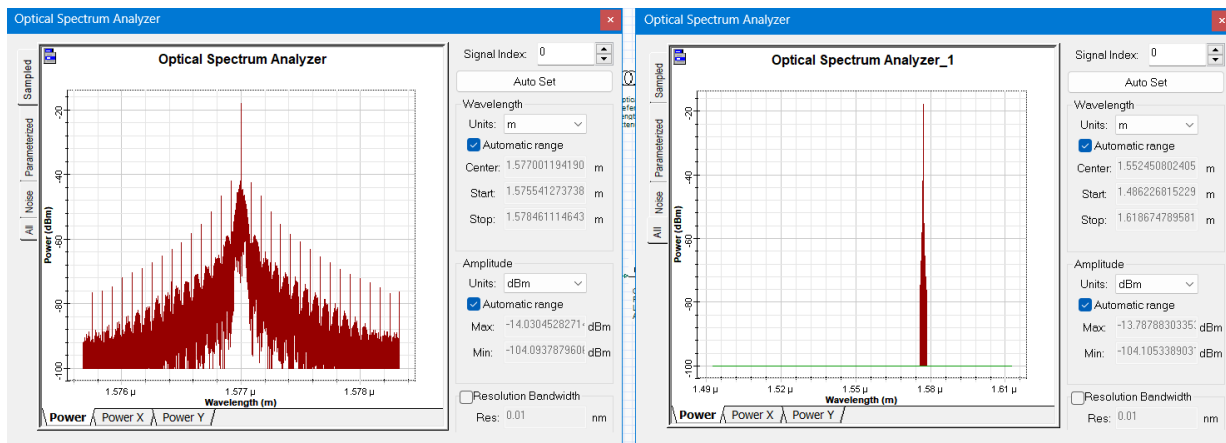
La medición se realiza en puntos estratégicos de la red, particularmente en el extremo de recepción final como se muestra en los recuadros de color rojo de la Figura 39, debido a que permite identificar la calidad de la señal resultante posterior al efecto de la amplificación óptica, los elementos pasivos y la distancia de transmisión, lo que permite determinar la separación efectiva entre la señal útil y el ruido asociado.

**Figura 39**  
*Puntos de medición OSNR*



El siguiente paso consiste en confirmar la ausencia de errores tanto en el proceso de cálculo como en los resultados generados al ejecutar la simulación, para posteriormente seleccionar los instrumentos de medición e identificar la información que despliegan en la interfaz, como se muestra en la Figura 40.

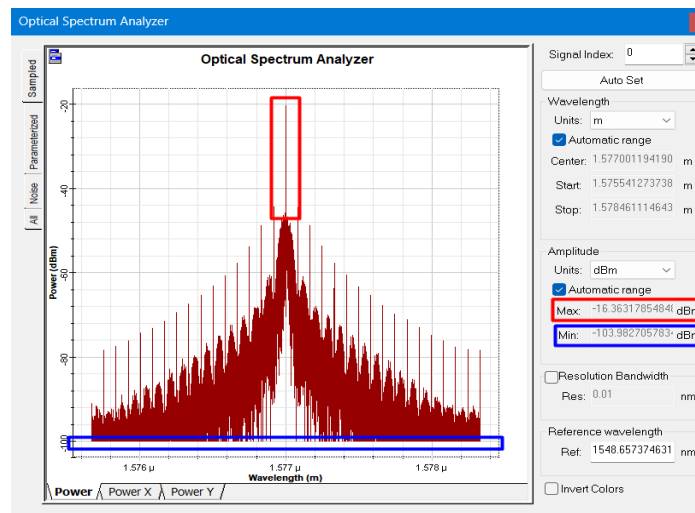
**Figura 40**  
*Información del Optical Spectrum Analyzer*



La obtención de los resultados de la relación señal-ruido óptica se realiza a partir de la información espectral proporcionada por la herramienta del analizador del espectro óptico, el cual permite visualizar la distribución de potencia de la señal óptica en función de la longitud de onda. En la Figura 40 se observa el espectro correspondiente al enlace evaluado, donde el pico central representa la señal óptica útil transmitida en el canal de interés, mientras que el nivel continuo que rodea al canal corresponde al ruido óptico, principalmente asociado al ruido ASE introducido por los amplificadores ópticos presentes en el sistema.

A partir del análisis del espectro óptico, el cálculo del OSNR se fundamenta en la identificación de dos parámetros clave: la potencia de la señal y la potencia del ruido óptico, en este sentido, la Figura 41 ilustra de manera gráfica los valores que se consideran para dicho cálculo. Por un lado, identifica la potencia máxima del pico central del canal óptico, destacada mediante recuadros de color rojo y centrada en la longitud de onda de 1577 nm, la cual representa la señal útil transmitida, paralelo a ese proceso también es necesario determinar el nivel del piso de ruido, señalado con recuadros de color azul, el cual es medido en bandas adyacentes al canal donde no se observa contribución de señal.

**Figura 41**  
*Parámetros OSNR*



Finalmente, la diferencia entre ambos valores permite calcular la relación señal-ruido óptica (OSNR), expresada en decibelios, la cual actúa como un indicador directo de la calidad espectral del enlace analizado; en este sentido, los valores de OSNR obtenidos tanto para el usuario próximo como para el usuario distante se presentan de manera comparativa en la Tabla 18, lo que facilita el análisis del impacto de la distancia y de la red de distribución óptica sobre el rendimiento global del sistema.

**Tabla 18**  
*Resultados de OSNR del primer escenario*

Punto de medición	Potencia de la señal	Potencia del ruido	OSNR
Usuario lejano (975m)	-16.363 dBm	-103.983 dBm	87.620 dB
Usuario cercano (75m)	-16.126 dBm	-103.993 dBm	87.867 dB

#### 4.2.1.3. Tasa de error de bits

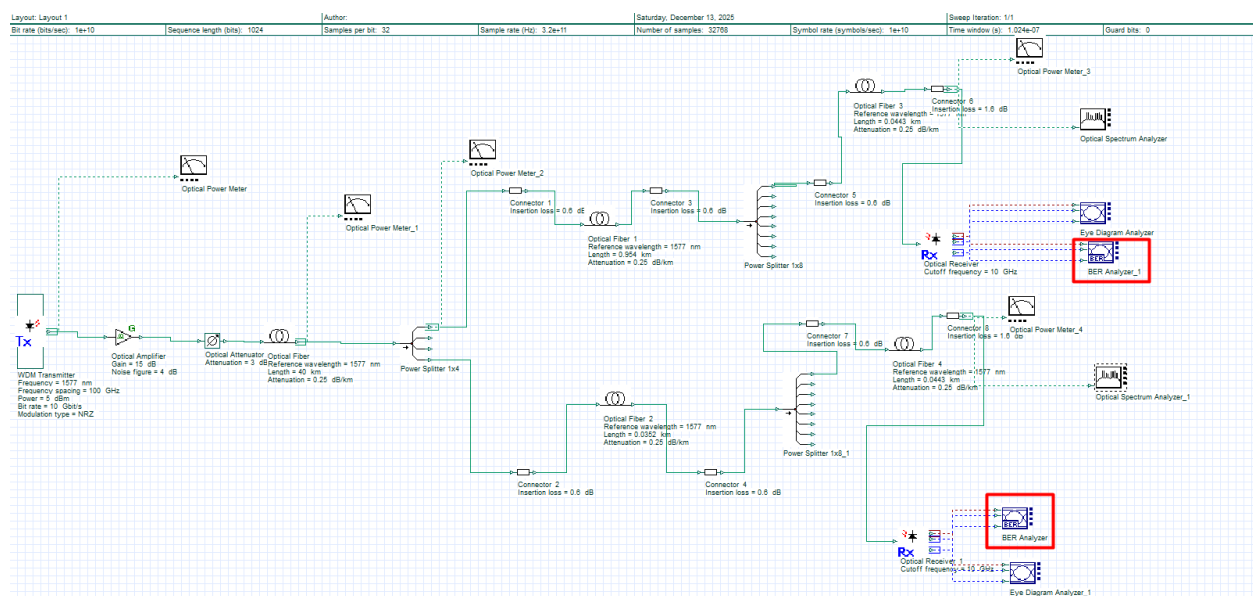
La evaluación del BER se lleva a cabo siguiendo el procedimiento establecido en el algoritmo de la Figura 29, el cual permite cuantificar la calidad de la transmisión desde el punto de vista de la integridad de los datos recibidos. Para este análisis, se emplea el BER Analyzer como herramienta de medición en OptiSystem, el cual compara la secuencia de bits transmitida

con la secuencia recuperada en el receptor, permitiendo determinar la probabilidad de error en la detección de la información.

La medición del BER se realiza en los extremos finales del enlace, es decir, en los receptores ópticos que simulan a las ONT, tal como se indica mediante los recuadros de color rojo en la Figura 42. Esta ubicación permite identificar como el efecto acumulado de la atenuación del enlace, el splitteo jerárquico, la amplificación óptica y el ruido introducido por el sistema afecta la señal recibida.

De manera complementaria, el análisis del BER se apoya en la observación del diagrama de ojo, lo que permite identificar posibles degradaciones asociadas a ruido, distorsión o interferencias, y evaluar el cumplimiento de los requisitos de desempeño establecidos para el sistema XGS-PON bajo el escenario de distancia máxima.

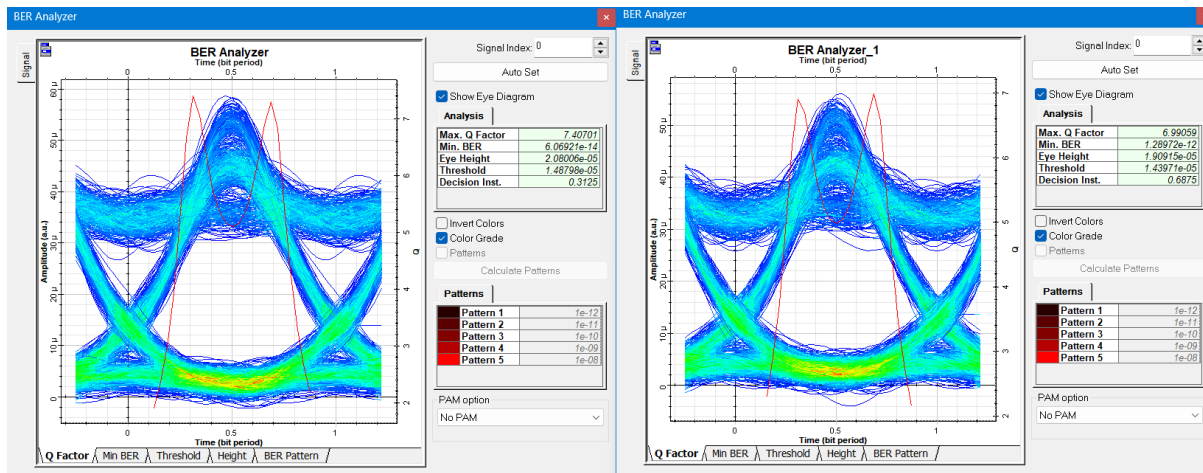
**Figura 42**  
*Puntos de medición BER*



Una vez ejecutada la simulación, es necesario verificar que el proceso se ha completado correctamente, asegurando que no existan inconsistencias ni errores en los cálculos realizados ni en los resultados obtenidos. Posteriormente, se identifican y seleccionan los instrumentos de

medición correspondientes a esta métrica de medición, tal como se ilustra en la Figura 27 con el analizador BER.

**Figura 43**  
*Información del BER Analyzer*



La obtención de los resultados se realiza a partir de la información proporcionada por la herramienta, la cual permite evaluar la calidad de la transmisión en el dominio digital como en el dominio temporal. En la Figura 27 se presentan los diagramas de ojo correspondientes a los puntos de recepción analizados, los cuales se generan a partir de la superposición de múltiples trazas de la señal<sup>2</sup> recibida a lo largo de varios intervalos de bit, de modo que la forma y apertura del diagrama de ojo constituyen un indicador visual directo del desempeño del enlace, ya que permiten identificar la presencia de ruido, distorsión e interferencias acumuladas durante la transmisión.

Un diagrama de ojo se considera bien definido cuando presenta una apertura significativa tanto en el eje vertical como en el eje horizontal, ya que esto evidencia una clara distinción entre los niveles lógicos<sup>3</sup>, un margen de decisión<sup>4</sup> adecuado y, en consecuencia, una

<sup>2</sup> Trazas de la señal: Son las múltiples formas de onda de la señal recibida superpuestas entre sí durante diferentes intervalos de tiempo o bits consecutivos.

<sup>3</sup> Niveles lógicos: Indican los valores de señal correspondientes al 1 y al 0.

<sup>4</sup> Margen de decisión: Se refiere al espacio de muestreo que tiene el receptor para decidir correctamente si un bit recibido corresponde a un '0' o a un '1', aun cuando la señal esté afectada por ruido o interferencias.

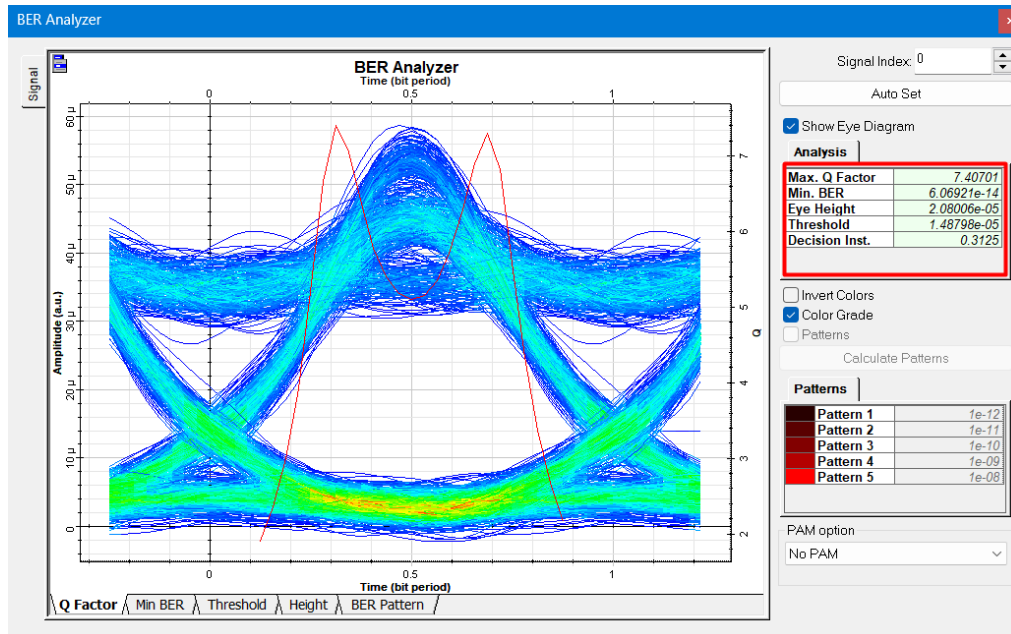
menor probabilidad de error en la detección de bits, lo que se traduce en valores reducidos de la tasa de error de bit (BER). Por el contrario, cuando el diagrama de ojo se encuentra degradado y muestra un cierre parcial o total, se pone de manifiesto la influencia de fenómenos como el ruido excesivo, la dispersión o el *jitter*, los cuales reducen la amplitud del ojo y el margen temporal de muestreo, incrementando así la probabilidad de errores durante la transmisión.

Un componente adicional que puede observarse en el diagrama de ojo es la línea roja superpuesta, la cual representa el umbral de decisión y la ventana de muestreo óptima utilizada por el receptor para diferenciar entre los distintos niveles lógicos; de este modo, dicha línea señala tanto el instante temporal como la magnitud en los que el Analizador de BER realiza la evaluación de la señal recibida con el propósito de minimizar la probabilidad de error en la detección de bits. Asimismo, cuando esta línea atraviesa una zona central del ojo que se presenta considerablemente amplia, tal como se muestra en la Figura 43 , se evidencia que el proceso de muestreo se lleva a cabo en condiciones óptimas, garantizando una clara separación entre los niveles lógicos y un margen de decisión adecuado. Por el contrario, si la línea intersectara zonas cercanas al cierre del ojo indicaría una mayor susceptibilidad al ruido y a la distorsión, incrementando el BER.

A partir de esta información, el análisis del BER se fundamenta en la identificación de los parámetros que entrega directamente el analizador que son resaltados en el recuadro rojo de la Figura 44, en los cuales destacan el valor mínimo de BER (Min. BER), que cuantifica la probabilidad de error en la detección de bits; el Q factor, el cual representa la separación estadística entre los niveles lógicos y se relaciona directamente con la calidad de la señal; la altura del ojo (Eye Height), que indica el margen de decisión disponible frente al ruido; y el umbral de decisión (Threshold), que define el punto óptimo de muestreo.

La correcta interpretación conjunta de estos parámetros, junto con la apertura visual del diagrama de ojo, permite validar el desempeño del sistema XGS-PON y comparar los valores obtenidos con los criterios de calidad establecidos para cada escenario.

**Figura 44**  
*Parámetros BER*



Finalmente, a partir de los valores proporcionados por el BER Analyzer en cada uno de los puntos finales de medición del enlace, es posible determinar la tasa de error de bits (BER) como un indicador directo de la integridad de la información recibida en el extremo de la red. En este sentido, el BER refleja de manera cuantitativa la calidad de la transmisión digital luego de que la señal ha sido afectada por la atenuación, el ruido y los elementos pasivos del enlace, por tanto, los valores de BER obtenidos para los casos correspondientes al usuario cercano y al usuario más lejano se presentan de forma comparativa en la Tabla 19, permitiendo evaluar el desempeño del enlace bajo las condiciones establecidas para el escenario analizado.

**Tabla 19**  
*Resultados del BER registrado en el primer escenario*

<b>Punto de medición</b>	<b>BER mínimo</b>
Usuario lejano (975m)	$1.98272 \times 10^{-12}$
Usuario cercano (75m)	$6.06921 \times 10^{-14}$

#### **4.2.2 Escenario 2: División de Señal**

El segundo escenario de evaluación corresponde al análisis del sistema XGS-PON bajo condiciones de alta división de señal, considerando un factor total de splitteo  $1 \times 128$  y un esquema de amplificación distribuida, tal como fue descrito en la sección 3.6.2. En este contexto del escenario de pruebas, el monitoreo de las métricas de desempeño se orienta a examinar el impacto que genera la amplificación y decisión de la red sobre los parámetros fundamentales del enlace, particularmente la potencia óptica disponible en los extremos de recepción, la degradación de la relación señal-ruido óptica y la integridad de la información transmitida.

##### **4.2.2.1. Potencia de la señal**

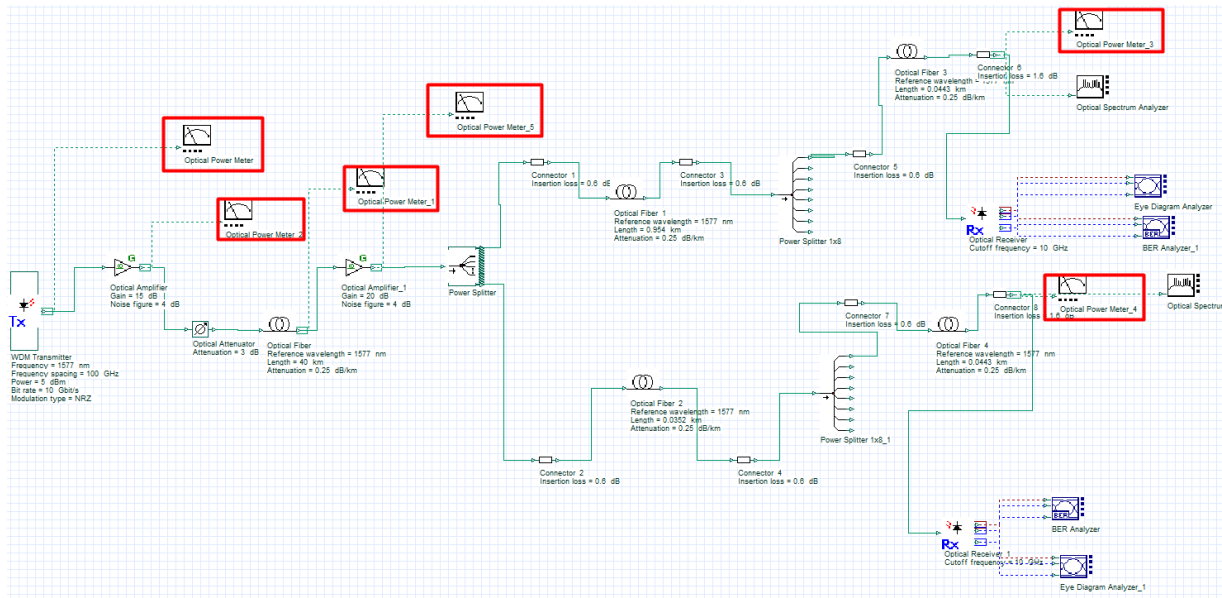
El análisis de la potencia de la señal óptica en este escenario se desarrolla siguiendo el mismo procedimiento metodológico descrito previamente para el Escenario 1, el cual se encuentra definido en el algoritmo presentado en la Figura 27. En este sentido, se mantiene el uso del Optical Power Meter como herramienta principal de medición, permitiendo evaluar los niveles de potencia óptica a lo largo de los distintos tramos del enlace, desde la salida del transmisor, pasando por los elementos de amplificación y los diferentes niveles de splitteo, hasta llegar a los receptores que simulan a los usuarios finales.

La principal diferencia respecto al escenario anterior radica en el incremento del número de puntos de medición, debido al mayor nivel de división de la red. Tal como se muestra en la Figura 45 mediante los recuadros resaltados en color rojo, estos puntos

adicionales permiten monitorear de forma más detallada la evolución de la potencia óptica a lo largo de la red y verificar que, aun bajo condiciones de alta densidad de usuarios, amplificación y mayores pérdidas acumuladas, los valores obtenidos se mantengan dentro de los rangos aceptables definidos para la tecnología XGS-PON.

**Figura 45**

*Puntos de medición de potencia óptica en el enlace del segundo escenario*



Una vez el posicionamiento de medición ha sido determinado, el proceso continúa con la ejecución de la simulación y la verificación de su correcta finalización, comprobando que no existan errores ni en el proceso de cálculo ni en los resultados generados. Bajo estas condiciones, el software confirma que todas las operaciones han sido realizadas de manera satisfactoria, tal como se evidencia en la Figura 32, la cual muestra el estado de la simulación concluida sin presencia de errores.

Finalizada la simulación, la Tabla 20 recopila los resultados obtenidos por parte de cada uno de los instrumentos de medición de potencia óptica desplegados en el escenario, lo que facilita el análisis de la evolución de la potencia óptica desde el punto de origen de la transmisión hasta los usuarios finales.

**Tabla 20**  
Registro de niveles de potencia en la red del escenario 2

Elemento	Medición	Lugar en la red
Optical Power Meter	2.937 dBm	Transmisor WDM
Optical Power Meter 1	17.407 dBm	Salida del amplificador EDFA_1
Optical Power Meter 2	4.407 dBm	Final del enlace de 40 km
Optical Power Meter 4	19.414 dBm	Salida del amplificador EDFA_2
Optical Power Meter 5	16.414 dBm	Atenuador de 3 dBm
Optical Power Meter 6	1.272 dBm	Primer splitter 1x16
Optical Power Meter 7	-10.197 dBm	Splitter 1x8 (usuario lejano)
Optical Power Meter 8	-9.968 dBm	Splitter 1x8 (usuario cercano)
Optical Power Meter 9	-11.408 dBm	Usuario más lejano (975m)
Optical Power Meter 10	-11.179 dBm	Usuario cercano (75m)

Con la simulación finalizada, el análisis se centra en el cálculo teórico del presupuesto de potencia para el Escenario 2, el cual considera una mayor división de la señal óptica, mediante el uso de un splitter 1×16 seguido de un splitter 1×8, así como la incorporación de dos amplificadores EDFA en el enlace. Para este cálculo se tomaron en cuenta las pérdidas asociadas a los tramos de fibra óptica, empalmes, atenuadores y dispositivos de división óptica, permitiendo estimar la pérdida total acumulada del sistema.

A partir del detalle de pérdidas calculadas para el usuario más lejano, considerando una distancia adicional de 975 m desde el último punto de distribución, y sumando la ganancia proporcionada por ambos amplificadores EDFA, se estimó el nivel de potencia óptica que llega a la ONT correspondiente a este usuario. El resultado del presupuesto de potencia teórico se presenta en la Tabla 21, evidenciando que, pese al incremento de las pérdidas por mayor división de la señal, el nivel de potencia recibido se mantiene dentro de los márgenes operativos establecidos para la tecnología XGS-PON

**Tabla 21**  
Tabla de pérdidas totales del enlace de fibra óptica del usuario lejano

Elemento	Cantidad	Pérdida unitaria	Pérdida total
Extinction ratio	1	-2.596 dB	$P_{otros}$
Fibra óptica (km)	40 km	0.25 dB/Km	$(L * \alpha)$

Empalmes por fusión	3	0.1 dB	$P_{emp}$
Conectores	2	0.6 dB	$P_{con}$
Atenuador óptico	2	3 dB	$P_{otros}$
Splitter 1x16	1	15 dB	$P_{split}$
Splitter 1x8	1	11 dB	$P_{split}$
Fibra óptica (km)	0.975 km	0.25 dB/Km	$(L * \alpha)$

Reemplazando los valores de la Tabla 21 en la ecuación del cálculo de la potencia total de la (Ec. 18), se obtiene la expresión (Ec. 5).

$$\begin{aligned}
 P_{total}(dB) &= (L * \alpha) + P_{emp} + P_{con} + P_{split} + P_{otros} \\
 P_{total}(dB) &= (40\text{km} * 0.25 \text{ dB/Km}) + (0.975\text{km} * 0.25 \text{ dB/Km}) \\
 &\quad + (3 * 0.1 \text{ dB}) + (2 * 0.6 \text{ dB}) + (1 * 15 \text{ dB}) + (1 * 11 \text{ dB}) \quad \text{(Ec. 5)} \\
 &\quad + (2.596 \text{ dB} + (2 * 3 \text{ dB})) \\
 P_{total}(dB) &= -46.34 \text{ dB}
 \end{aligned}$$

A partir del detalle de pérdidas calculadas para el usuario más lejano en la (Ec. 5), considerando una distancia adicional de 975 m desde el último punto de distribución, y sumando la ganancia proporcionada por ambos amplificadores EDFA, se estimó el nivel de potencia óptica que llega a la ONT correspondiente a este usuario. El resultado del presupuesto de potencia teórico se presenta en la Tabla 22, evidenciando que, pese al incremento de las pérdidas por mayor división de la señal, el nivel de potencia recibido se mantiene dentro de los márgenes operativos establecidos para la tecnología XGS-PON.

**Tabla 22**  
Resultado del presupuesto de potencia en la ONT del usuario lejano

Concepto	Valor
Potencia de salida OLT	+5 dBm
Ganancia EDFA 1	+15 dB
Ganancia EDFA 2	+15 dB
Pérdidas totales de la red	-46.34 dB

<b>Potencia estimada en ONT</b>	-11.34 dBm
---------------------------------	------------

De forma análoga, se realizó el cálculo del presupuesto de potencia para el usuario cercano, ubicado a una distancia de 75 m desde el punto de distribución. Si bien los elementos activos y pasivos de la red permanecen constantes respecto al usuario más lejano, la reducción en la longitud del tramo final de fibra óptica genera una ligera disminución en las pérdidas totales del enlace. Los resultados obtenidos para este escenario se presentan en la Tabla 23, permitiendo comparar el impacto de la distancia en el nivel de potencia óptica recibida.

**Tabla 23**

*Resultado del presupuesto de potencia en la ONT del usuario cercano*

<b>Elemento</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Pérdida unitaria</b>	<b>Pérdida total</b>
Extinction ratio	1	-2.596 dB	-2.596 dB
Fibra óptica (km)	40 Km	0.25 dB/Km	-10 dB
Empalmes por fusión	3	0.1 dB	-0.3 dB
Conectores	2	0.6 dB	-1.2 dB
Atenuador óptico	2	3 dB	-9 dB
Splitter 1x16	1	15 dB	-15 dB
Splitter 1x8	1	11 dB	-11 dB
Fibra óptica (km)	0.075 Km	0.25 dB/Km	-0.019 dB
<b>Total</b>			-46.12 dB

Con base en las pérdidas totales del enlace determinadas previamente y considerando los parámetros de potencia y amplificación del sistema, se procede a calcular el presupuesto de potencia teórico correspondiente al usuario cercano del Escenario 2. Para este cálculo se toma en cuenta la potencia de salida de la OLT, la ganancia aportada por los dos amplificadores EDFA y la pérdida total acumulada de la red, con el fin de estimar el nivel de potencia óptica que llega a la ONT del usuario final. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 24.

**Tabla 24**  
*Resultado del presupuesto de potencia en la ONT del usuario cercano*

<b>Concepto</b>	<b>Valor</b>
Potencia de salida OLT	+5 dBm
Ganancia EDFA 1	+15 dB
Ganancia EDFA 2	+15 dB
Pérdidas totales de la red	-46.12 dB
<b>Potencia estimada en ONT</b>	<b>-11.12 dBm</b>

#### 4.2.2.2. Relación señal-ruido

Para el Escenario 2, el proceso de evaluación de la relación señal-ruido óptica (OSNR) se mantiene idéntico al descrito previamente para el Escenario 1, tanto en lo referente a la ubicación de los puntos de medición como al procedimiento de obtención de los resultados. En este sentido, se conserva el uso del Optical Spectrum Analyzer, así como la medición en los extremos finales del enlace, correspondientes a los receptores que simulan a las ONT, debido a que en estos puntos se manifiesta de forma acumulada el efecto del mayor nivel de splitteo, la amplificación óptica y las pérdidas del enlace. Por tanto, no se introducen modificaciones en el algoritmo ni en la metodología de cálculo, limitándose el análisis al registro de los nuevos valores obtenidos bajo las condiciones particulares de este escenario.

Una vez confirmada la correcta ejecución de la simulación y verificada la ausencia de errores, se procede a registrar la potencia de la señal, la potencia del ruido óptico y el valor de OSNR en los puntos de recepción correspondientes al usuario cercano y al usuario más lejano. Los resultados obtenidos se presentan de forma comparativa en la Tabla 25, donde se observa que, pese al incremento significativo del nivel de splitteo, los valores de OSNR se mantienen elevados, con 88,150 dB para el usuario lejano y 88,405 dB para el usuario cercano, lo que evidencia una adecuada separación entre la señal útil y el ruido óptico.

**Tabla 25**  
*Resultados de OSNR del primer escenario*

Punto de medición	Potencia de la señal	Potencia del ruido	OSNR
Usuario lejano (954m)	-15.856 dBm	-104.006 dBm	88.150 dB
Usuario cercano (35m)	-15.613 dBm	-104.018 dBm	88.405 dB

#### 4.2.2.3. Tasa de error de bits

Para el segundo escenario, la evaluación de la tasa de error de bits se realiza manteniendo el mismo esquema de medición definido la Figura 29, por lo que no se introducen modificaciones ni en el algoritmo de cálculo ni en la ubicación de los puntos de análisis.

Una vez ejecutada la simulación y verificada su correcta finalización, se procede al registro de los valores de BER mínimo proporcionados por el BER Analyzer, los cuales se resumen en la Tabla 26. Los resultados obtenidos muestran valores de  $3,42499 \times 10^{-18}$  para el usuario más lejano y de  $1,94651 \times 10^{-20}$  para el usuario cercano, evidenciando una probabilidad de error baja en ambos casos, de modo que estos valores confirman que, a pesar del incremento del nivel de división de la red y una post amplificación el sistema XGS-PON mantiene un desempeño robusto en términos de integridad de datos, cumpliendo con los criterios de calidad establecidos para este tipo de tecnología.

**Tabla 26**  
*Resultados del BER registrado en el segundo escenario*

Punto de medición	BER mínimo
Usuario lejano (975m)	$3.42499 \times 10^{-18}$
Usuario cercano (75m)	$1.94651 \times 10^{-20}$

#### 4.2.3 Escenario 3: Coexistencia tecnológica

El tercer escenario del testbed se orienta al análisis del comportamiento del sistema bajo condiciones de coexistencia tecnológica, donde múltiples señales ópticas comparten una misma red de distribución. A diferencia de los escenarios anteriores, en este caso la evaluación

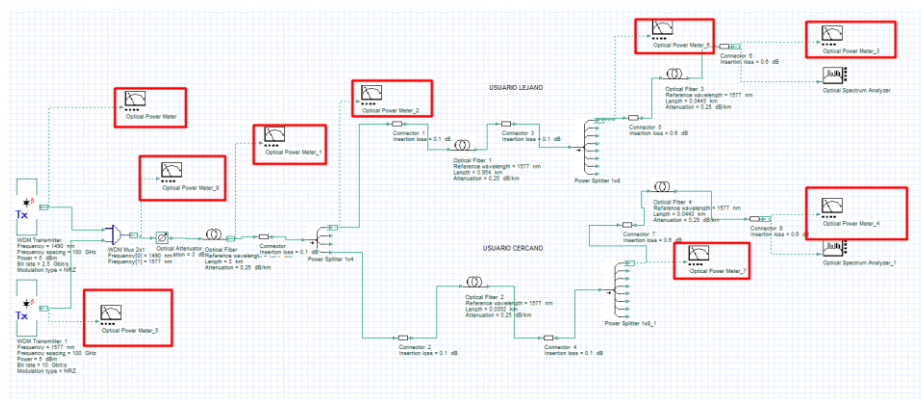
del desempeño se centra exclusivamente en métricas de carácter espectral, debido a que el interés principal radica en verificar la correcta separación entre canales y la calidad de la señal en un entorno de transmisión simultánea. Por ello, el análisis se limita al estudio de los niveles de potencia óptica y del espectro de la señal óptica, métricas que permiten identificar posibles interferencias, efectos de crosstalk y estabilidad espectral, garantizando así la operación conjunta de las tecnologías consideradas sin degradaciones significativas en la calidad del enlace.

#### 4.2.3.1. Potencia de la señal

El análisis de la potencia de la señal óptica en el tercer escenario se realiza manteniendo el mismo procedimiento metodológico aplicado en los escenarios previos, particularmente el descrito para el Escenario 1 y presentado en la Figura 27. En consecuencia, se conserva el uso del Optical Power Meter como instrumento principal de medición con la principal diferencia que incrementa el número de puntos de medición, debido al mayor nivel de división de la red. Tal como se muestra en la Figura 46 mediante los recuadros resaltados en color rojo, estos puntos adicionales permiten monitorear de forma más detallada la evolución de la potencia óptica a lo largo de la red y verificar que, los valores obtenidos son estables dentro de los rangos aceptables definidos para la tecnología XGS-PON y XG-PON.

**Figura 46**

*Puntos de medición de potencia óptica en el enlace del tercer escenario*



Una vez definidos los puntos de medición a lo largo del enlace, la simulación es ejecutada y completada sin presentar errores en el proceso de cálculo ni en la generación de resultados, condición que valida la correcta configuración del modelo bajo las condiciones establecidas, y dado que el procedimiento de medición ya ha sido descrito en secciones anteriores, el análisis se concentra únicamente en la recopilación y evaluación de los valores finales de potencia óptica proporcionados por los instrumentos de medición.

En este contexto, la Tabla 27 presenta de manera consolidada los niveles de potencia óptica registrados en los distintos puntos del enlace para ambas tecnologías, permitiendo, en una primera instancia, identificar la potencia óptica inicial correspondiente a cada transmisor XG-PON y XGS-PON. A partir de estos valores de referencia, es posible analizar la evolución de la potencia a lo largo del enlace óptico, considerando el efecto de la fibra, los elementos pasivos de la red de distribución y los diferentes niveles de división, hasta alcanzar los puntos de recepción final.

**Tabla 27**

*Registro de niveles de potencia en la red del tercer escenario*

<b>Elemento</b>	<b>Medición</b>	<b>Lugar en la red</b>
Optical Power Meter	2.459 dBm	Transmisor WDM XG-PON
Optical Power Meter 2	2.359 dBm	Transmisor WDM XGS-PON
Optical Power Meter 3	5.274 dBm	Multiplexor 2X1
Optical Power Meter 5	1.524 dBm	Final del enlace de 3 km
Optical Power Meter 7	-6.596 dBm	Primer splitter 1x4
Optical Power Meter 8	-18.066 dBm	Segundo splitter 1x8 (975m)
Optical Power Meter 8	-15.836 dBm	Segundo splitter 1x8 (75m)
Optical Power Meter 9	-19.277 dBm	Usuario más lejano (975m)
Optical Power Meter 10	-19.047 dBm	Usuario cercano (75m)

Con el fin de analizar el comportamiento del enlace de acceso en un escenario de coexistencia tecnológica entre XG-PON y XGS-PON, se realizó el cálculo teórico del presupuesto de potencia, considerando la misma infraestructura de red y los elementos pasivos compartidos por ambas tecnologías. Este análisis permite evaluar el impacto de la topología

del enlace y de las pérdidas asociadas a cada componente sobre el nivel de potencia óptica recibido en la ONT, garantizando que la coexistencia no afecte el correcto funcionamiento del servicio.

En este contexto, se presenta el cálculo de las pérdidas totales del enlace correspondiente al usuario cercano, cuya distancia adicional desde el punto de distribución es de 75 m. Para este cálculo se consideraron las pérdidas asociadas a los tramos de fibra óptica, empalmes y dispositivos de división óptica empleados en el escenario de coexistencia tecnológica. El detalle de las pérdidas acumuladas se muestra en la Tabla 28.

**Tabla 28**

*Tabla de pérdidas totales del enlace de fibra óptica del usuario cercano*

Elemento	Cantidad	Pérdida unitaria	Pérdida total
Extinction ratio	1	-2.596 dB	$P_{otros}$
Fibra óptica (km)	3 km	0.25 dB/Km	$(L * \alpha)$
Empalmes por fusión	3	0.1 dB	$P_{emp}$
Conectores	2	0.6 dB	$P_{con}$
Atenuador óptico	1	3 dB	$P_{otros}$
Splitter 1x4	1	7 dB	$P_{split}$
Splitter 1x8	1	11 dB	$P_{split}$
Fibra óptica (km)	0.075 km	0.25 dB/Km	$(L * \alpha)$

Reemplazando los valores de la Tabla 28 en la ecuación del cálculo de la potencial total de la (Ec. 18), se obtiene la expresión (Ec. 6).

$$\begin{aligned}
 P_{total}(dB) &= (L * \alpha) + P_{emp} + P_{con} + P_{split} + P_{otros} \\
 P_{total}(dB) &= (3km * 0.25 \text{ dB/Km}) + (0.075km * 0.25 \text{ dB/Km}) \\
 &\quad + (3 * 0.1 \text{ dB}) + (2 * 0.6 \text{ dB}) + (1 * 7 \text{ dB}) + (1 * 11 \text{ dB}) \quad \text{(Ec. 6)} \\
 &\quad + (2.596 \text{ dB} + (1 * 3 \text{ dB})) \\
 P_{total}(dB) &= -25.87 \text{ dB}
 \end{aligned}$$

A partir de las pérdidas totales del enlace previamente determinadas y considerando la potencia de salida de la OLT, se realizó el cálculo del presupuesto de potencia teórico para el usuario cercano. Este cálculo permite estimar el nivel de potencia óptica que llega a la ONT en un entorno de coexistencia XG-PON / XGS-PON. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 29.

**Tabla 29**  
*Resultado del presupuesto de potencia en la ONT del usuario cercano*

Concepto	Valor
Potencia de salida OLT	+5 dBm
Pérdidas totales de la red	-25.87 dB
<b>Potencia estimada en ONT</b>	<b>-20.87 dBm</b>

De manera similar, se efectuó el cálculo de las pérdidas totales del enlace para el usuario más lejano, ubicado a una distancia adicional de 975 m desde el punto de distribución. Aunque la topología de la red y los elementos pasivos se mantienen constantes respecto al usuario cercano, la mayor longitud del tramo final de fibra óptica genera un incremento en las pérdidas acumuladas del enlace. El detalle de este cálculo se presenta en la Tabla 30.

**Tabla 30**  
*Tabla de pérdidas totales del enlace de fibra óptica del usuario más lejano*

Elemento	Cantidad	Pérdida unitaria	Pérdida total
Extinction ratio	1	-2.596 dB	-2.596 dB
Fibra óptica (km)	3 km	0.25 dB/Km	-0.75 dB
Empalmes por fusión	3	0.1 dB	-0.3 dB
Conectores	2	0.6 dB	-1.2 dB
Atenuador óptico	1	3 dB	-3 dB
Splitter 1x4	1	7 dB	-7 dB
Splitter 1x8	1	11 dB	-11 dB
Fibra óptica (km)	0.975 km	0.25 dB/Km	-0.244 dB
<b>Total</b>			<b>-26.1 dB</b>

Considerando las pérdidas totales calculadas para el usuario más lejano y la potencia de salida de la OLT, se estimó el nivel de potencia óptica recibido en la ONT correspondiente. El resultado del presupuesto de potencia teórico se presenta en la Tabla 35, permitiendo evaluar el impacto de la distancia en el nivel de potencia óptica recibida dentro de un escenario de coexistencia tecnológica entre XG-PON y XGS-PON.

**Tabla 31**

*Resultado del presupuesto de potencia en la ONT del usuario más lejano*

<b>Concepto</b>	<b>Valor</b>
Potencia de salida OLT	+5 dBm
Pérdidas totales de la red	-26.1 dB
<b>Potencia estimada en ONT</b>	<b>-21.1 dBm</b>

#### 4.2.3.2. Espectro de la señal óptica

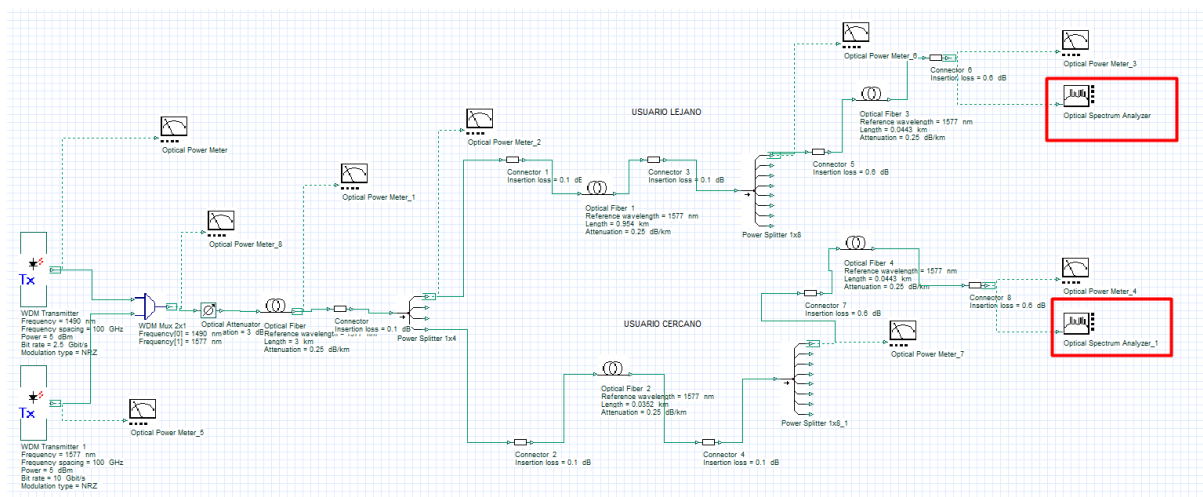
La evaluación del espectro de la señal óptica en este escenario tiene como objetivo principal verificar la correcta coexistencia de las tecnologías XG-PON y XGS-PON sobre una misma red de distribución óptica, analizando su comportamiento espectral y la adecuada separación entre canales. Para este propósito, se emplea la herramienta Optical Spectrum Analyzer de OptiSystem, la cual permite observar la distribución de potencia en función de la longitud de onda y comprobar que cada tecnología ocupa su banda espectral asignada sin generar interferencias significativas

En coherencia con el objetivo de analizar la coexistencia espectral de las tecnologías XG-PON y XGS-PON, los puntos de medición del espectro óptico se establecen exclusivamente en los extremos finales del enlace, es decir, en las interfaces de recepción que representan a los usuarios finales, tal como se observa en la Figura 47 mediante los recuadros resaltados en color rojo.

Esta elección se justifica en la medida en que el extremo de la red concentra el efecto acumulado de todos los fenómenos que inciden sobre la señal óptica a lo largo del enlace, dado

que en este punto confluyen la atenuación asociada a la distancia, las pérdidas introducidas por los divisores ópticos y los conectores, así como los efectos derivados de la multiplexación WDM; de este modo, la observación del espectro en dichos puntos permite realizar una evaluación integral, ya que posibilita analizar la separación efectiva entre canales, la estabilidad del pico espectral de cada tecnología y verificar la ausencia de interferencia cruzada (*crosstalk*), garantizando así que ambas señales puedan coexistir dentro de la misma ODN sin comprometer su integridad espectral.

**Figura 47**  
*Puntos de medición del espectro de la señal óptica*



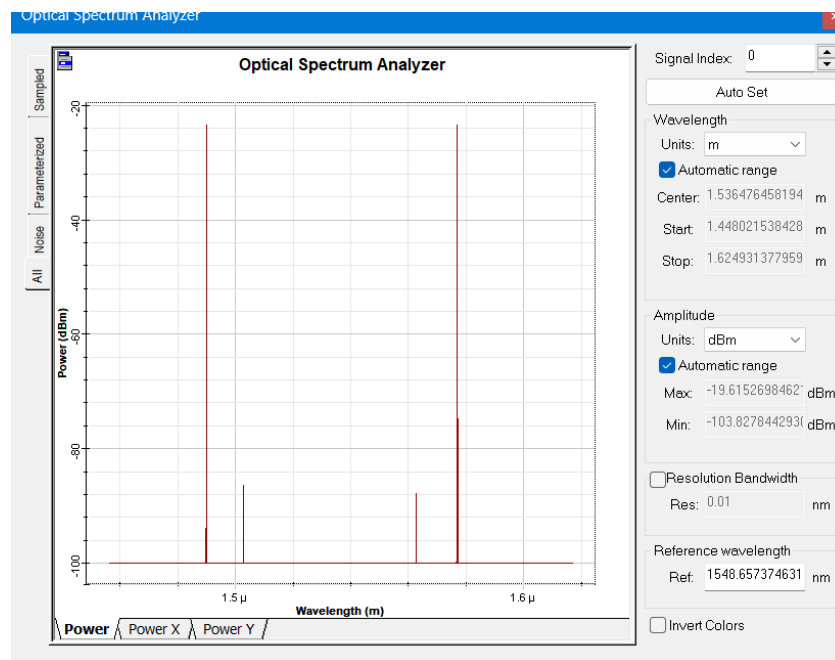
A partir de la información mostrada por el Optical Spectrum Analyzer, se identifican los parámetros espectrales necesarios para evaluar la coexistencia entre las tecnologías XG-PON y XGS-PON. En la Figura 48 correspondiente se deben señalar, en primer lugar, los picos espectrales principales, los cuales representan las señales ópticas útiles de cada tecnología y se encuentran centrados en sus respectivas longitudes de onda asignadas, por consiguiente la posición central de estos picos permite verificar la estabilidad espectral, comprobando que no existen desplazamientos significativos y que la variación se mantiene dentro del margen de  $\pm 0,1$  nm establecido como referencia.

Adicionalmente, en la misma figura se debe destacar la separación espectral entre los picos, medida como la distancia entre las longitudes de onda centrales de ambos canales, la

cual debe ser consistente con una separación mínima de 100 GHz. Asimismo, el nivel de potencia fuera de los picos, correspondiente al piso de ruido, debe observarse clara

**Figura 48**

*Analizador de espectros de coexistencia tecnológica*



Con base exclusiva en la información observable en las dos imágenes del Optical Spectrum Analyzer (una por cada extremo del enlace), se puede construir una tabla de resultados espectrales orientada a la comparación con los criterios de referencia de la ITU-T. Dado que OptiSystem permite leer directamente la posición espectral y el nivel de potencia de cada pico, los valores de la Tabla 32 que se presentan a continuación son obtenidos a partir de la inspección directa del espectro.

**Tabla 32**

*Registro del espectro de la señal del tercer escenario*

Parámetro evaluado	Resultado observado
Longitud de onda canal XG-PON	1490 nm
Longitud de onda canal XGS-PON	1577 nm
Separación espectral entre canales	87 nm
Crosstalk entre canales	-103.827 dBm

### 4.3. Comparación con los Estándares de la UIT-T

Una vez analizados de forma individual los resultados obtenidos para cada métrica de desempeño en los tres escenarios evaluados permiten realizar una comparación global de los valores registrados con los rangos de referencia establecidos en las recomendaciones de la ITU-T para sistemas XGS-PON. Este análisis permite determinar la factibilidad técnica de operación del sistema bajo distintas condiciones de despliegue, considerando escenarios límite de distancia, división de señal y coexistencia tecnológica.

#### 4.3.1. Escenario 1: Distancia Máxima

A partir de los resultados de los parámetros de evaluación recopilados en la Tabla 33, se observa que las métricas obtenidas para el primer escenario cumplen con los valores de referencia establecidos por la ITU-T G.9807.1 para sistemas XGS-PON. En términos de potencia óptica, los niveles registrados en ambos usuarios se encuentran significativamente por encima del umbral mínimo requerido para la correcta operación del receptor, lo que evidencia que, aun bajo condiciones de distancia máxima y pérdidas acumuladas, el enlace dispone de un margen de potencia adecuado.

Con respecto a la relación señal a ruido, los valores medidos fueron mayores a 20 dB (requisito mínimo), por lo que se puede considerar que la señal tiene muy buena calidad espectral y también se encontró una buena separación entre la señal y el ruido; también, los valores de BER son menores al orden de  $10^{-18}$ , asegurando una transmisión confiable y alta integridad de la información recibida.

**Tabla 33**  
*Métricas de desempeño del sistema XGS-PON en el primer escenario*

Métrica de evaluación	Receptor	Valor	Valor de referencia ITU-T G.9807.1
Potencia de la señal	Lejano (975m)	-16.394 dBm	-29 a -32 dBm
	Cercano (75m)	-16.164 dBm	
Relación señal-ruido	Lejano (975m)	87.620 dB	> 20 dB

	Cercano (75m)	87.867 dB	
Tasa de error de bits	Lejano (975m)	$1.8716 \times 10^{-14}$	$\leq 1 \times 10^{-12}$
	Cercano (75m)	$8.9756 \times 10^{-16}$	

Los niveles de potencia registrados en la Tabla 33 muestran que el usuario cercano presenta una potencia de  $-16,164$  dBm, mientras que el usuario lejano alcanza un valor de  $-16,394$  dBm, lo que conlleva a que ambos resultados se encuentran dentro del rango operativo establecido por la normativa, lo cual indica que existe un margen de potencia suficiente para asegurar una correcta detección de la señal.

Finalmente, los valores registrados de la relación señal-ruido correspondientes a  $87,620$  dB y  $87,867$  dB para cada usuario respectivamente, superan el umbral mínimo recomendado de  $20$  dB, de modo que esto refleja una adecuada calidad espectral de la señal y una eficiente supresión del ruido óptico a lo largo del enlace. Además, los valores de BER en el orden de  $10^{-12}$  y  $10^{-14}$ , se sitúan en magnitudes por debajo del máximo permitido por la normativa,

#### ***4.3.2. Escenario 2: División de señal***

La información presentada en la Tabla 34 permite evaluar el desempeño del sistema XGS-PON bajo un escenario caracterizado por un elevado nivel de división de señal y mayores exigencias sobre el presupuesto óptico. En este contexto, los valores de potencia óptica recibida en los extremos del enlace alcanzan  $-14,318$  dBm para el usuario más lejano y  $-14,089$  dBm para el usuario cercano, lo que evidencia que, a pesar del incremento significativo de las pérdidas asociadas al splitteo, la señal mantiene niveles ampliamente superiores al rango mínimo recomendado por la ITU-T para receptores XGS-PON, establecido entre  $-29$  dBm y  $-32$  dBm. Esta diferencia confirma la disponibilidad de un margen de potencia suficiente para una detección fiable de la señal en ambos casos.

En cuanto a la relación señal-ruido óptica, los valores de OSNR obtenidos en este escenario, de  $88,150$  dB para el usuario lejano y  $88,405$  dB para el usuario cercano, ponen de

manifiesto una separación muy elevada entre la señal útil y el ruido óptico presente en el enlace, ya que superan ampliamente el umbral mínimo de 20 dB recomendado por la ITU-T; en consecuencia, estos resultados evidencian que tanto el esquema de amplificación como la arquitectura de la red pasiva no introducen degradaciones espectrales significativas, incluso bajo condiciones de alta densidad de usuarios y múltiples niveles de división.

Complementariamente, el análisis de BER sostiene también esta afirmación, ya que se obtiene un BER para cada usuario de  $3.424999 \times 10^{-18}$  para el más lejano y de  $1.94651 \times 10^{-20}$  para el usuario más cercano, estos valores son varios órdenes de magnitud inferiores al límite máximo aceptable definido por la recomendación ITU-T, que para sistemas XGS-PON se establece en  $1 \times 10^{-12}$ , evidenciando que la integridad de información transmitida es debidamente preservada aun cuando el enlace se encuentra en operación bajo condiciones más estrictas y mayor carga óptica..

**Tabla 34**  
*Métricas de desempeño del sistema XGS-PON en el segundo escenario*

Métrica de evaluación	Receptor	Valor	Valor ITU de referencia
Potencia de la señal	Lejano (975m)	-14.318 dBm	-29 a -32 dBm
	Cercano (75m)	-14.089 dBm	
Relación señal-ruido	Lejano (975m)	88.150 dB	> 20 dB
	Cercano (75m)	88.405 dB	
Tasa de error de bits	Lejano (975m)	$3.42499 \times 10^{-18}$	$\leq 1 \times 10^{-12}$
	Cercano (75m)	$1.94651 \times 10^{-20}$	

El análisis de los resultados consolidados en la Tabla 34 permite validar el desempeño del sistema XGS-PON bajo un escenario de alta división de señal, caracterizado por un incremento significativo de las pérdidas ópticas y una mayor exigencia sobre el presupuesto de potencia del enlace; en este contexto, los niveles de potencia óptica medidos en los extremos de recepción alcanzan valores de -14,318 dBm para el usuario más lejano y -14,089 dBm para el usuario cercano, los cuales se sitúan ampliamente por encima del rango mínimo de

sensibilidad recomendado por la ITU-T G.9807.1 para receptores XGS-PON, establecido entre  $-29$  dBm y  $-32$  dBm, lo que confirma la existencia de un margen de potencia suficiente para garantizar una correcta detección de la señal, incluso bajo condiciones de elevado *splitteo* y pérdidas acumuladas.

Los resultados de la calidad espectral indican que la relación señal a ruido óptica para el usuario lejano y el usuario cercano son  $88,150$  dB y  $88,405$  dB, lo que es mucho mayor que el umbral mínimo de  $20$  dB recomendado por la ITU-T. Además, las tasas de error de bits de  $3,42499 \times 10^{-18}$  y  $1,94651 \times 10^{-20}$  respectivamente, están por debajo del límite superior de los estándares, lo que significa que la integridad de la información transmitida puede ser conservado aún en condiciones más extremas.

#### ***4.3.3. Escenario 3: Coexistencia tecnológica***

Los resultados obtenidos para el Escenario 3, resumidos en la Tabla 35, permiten evaluar el comportamiento del sistema bajo condiciones de operación simultánea de las tecnologías XG-PON y XGS-PON sobre una misma red de distribución óptica. A diferencia de los escenarios previos, el análisis se centra en métricas de carácter espectral y en los niveles de potencia óptica en los extremos de recepción, ya que estos parámetros son determinantes para garantizar una coexistencia libre de interferencias entre ambas tecnologías.

En primer lugar, los niveles de potencia óptica recibida medidos en los extremos finales del enlace alcanzan valores de  $-14,318$  dBm para el usuario más lejano y  $-14,089$  dBm para el usuario cercano, los cuales se sitúan ampliamente por encima del rango mínimo recomendado por la ITU-T para receptores PON, establecido entre  $-29$  dBm y  $-32$  dBm; en consecuencia, estos resultados indican que la coexistencia de ambas tecnologías no introduce penalizaciones significativas en términos de potencia óptica disponible en los receptores. De este modo, se garantiza que cada señal pueda ser detectada de forma adecuada sin comprometer la sensibilidad del sistema.

Desde el punto de vista espectral, el análisis realizado mediante el Optical Spectrum Analyzer confirma que cada tecnología opera dentro de su banda de longitud de onda asignada. Los picos espectrales observados se encuentran centrados en 1490 nm para XG-PON y en 1577 nm para XGS-PON, coincidiendo exactamente con los valores de referencia definidos por la ITU-T. Asimismo, la separación espectral entre ambos canales alcanza un valor de 100 GHz, cumpliendo con el requisito mínimo establecido para evitar solapamientos espectrales e interferencia cruzada entre señales.

**Tabla 35**

*Métricas de desempeño del sistema XGS-PON en el tercer escenario*

<b>Métrica de evaluación</b>	<b>Receptor</b>	<b>Valor</b>	<b>Valor ITU de referencia</b>
Potencia de la señal	Lejano (975m)	-19.277 dBm	-29 a -32 dBm
	Cercano (75m)	-19.047 dBm	
Espectro de la señal óptica	Longitud de onda canal XG-PON	1490 nm	1490 nm
	Longitud de onda canal XGS-PON	1577 nm	1577 nm
	Separación espectral entre canales	100 GHz	$\geq 100$ GHz

En relación con la potencia óptica recibida, los valores medidos en los extremos del enlace alcanzan -19,277 dBm en el usuario más lejano y -19,047 dBm en el usuario cercano. Estos niveles superan ampliamente el umbral mínimo de sensibilidad especificado por la ITU-T para sistemas PON, el cual se sitúa entre -29 dBm y -32 dBm. Este margen positivo evidencia que la transmisión simultánea de ambas tecnologías no genera pérdidas adicionales significativas ni compromete la detección adecuada de las señales ópticas en los receptores, garantizando así una operación estable desde el punto de vista del presupuesto de potencia.

Por otro lado, el análisis espectral realizado mediante el analizador de espectros confirma que cada tecnología ocupa correctamente su banda de operación asignada, en donde se identifica los picos espectrales asociados a XG-PON y XGS-PON centrados en 1490 nm y 1577 nm, respectivamente, de acuerdo con con las longitudes de onda normalizadas por la ITU-T. Además, la separación espectral entre ambos canales alcanza los 100 GHz, cumpliendo con el criterio mínimo establecido para prevenir solapamientos espectrales y minimizar la posibilidad de interferencia cruzada entre señales coexistentes.

## Conclusiones y Recomendaciones

### Conclusiones

El desarrollo del testbed de simulación permitió el estudio integral de la tecnología XGS-PON conforme a la recomendación ITU-T G.9807.1, mediante la modelación de una arquitectura FTTH en un entorno controlado. A través del uso de herramientas de simulación óptica en el software de Optisystem, es posible reproducir de manera real el comportamiento de los distintos componentes del sistema, evaluando su desempeño bajo escenarios representativos y técnicamente exigentes, lo que valida la utilidad del testbed como instrumento de análisis y estudio de redes de acceso de nueva generación.

El análisis teórico desarrollado permitió identificar la fundamentación sobre la tecnología XGS-PON, abordando sus principios de funcionamiento, arquitectura, parámetros ópticos, clases de presupuesto de potencia y lineamientos normativos establecidos por la ITU-T, de modo que esta base conceptual permitió contextualizar adecuadamente la implementación del testbed y sustentar técnicamente los resultados del diseño obtenidos, garantizando coherencia entre la teoría y la simulación desarrollada.

Respecto al diseño de la topología de red, el testbed propuesto integró de forma consistente los elementos característicos de una red FTTH, incluyendo transmisores WDM, enlaces de fibra óptica monomodo, amplificadores ópticos, niveles jerárquicos de splitteo y receptores que simulan el comportamiento de las ONT, por ende, la correcta selección y configuración de los parámetros ópticos permitió representar escenarios de operación cercanos a condiciones reales.

La implementación de los escenarios del testbed en el software permitió evaluar el desempeño del sistema XGS-PON a través de métricas como la potencia de la señal óptica, relación señal-ruido óptica, tasa de error de bitsy comportamiento espectral, de modo que los resultados obtenidos en los escenarios demostraron que los valores medidos cumplen con los

rangos de referencia establecidos en las recomendaciones de la ITU-T, bajo condiciones de alta atenuación, elevados niveles de splitteo y operación simultánea con tecnologías coexistentes.

Finalmente, la evaluación de los resultados obtenidos del testbed permiten validar su utilidad como herramienta de análisis de la tecnología XGS-PON en entornos FTTH, debido a que permite el estudio de su comportamiento bajo diferentes condiciones de operación aportando un entorno de simulación consistente, que puede emplearse como base para futuras investigaciones, así como para estudios relacionados con procesos de migración tecnológica, análisis de escalabilidad y evaluación de nuevas arquitecturas de acceso óptico.

## Recomendaciones

A partir de los resultados obtenidos y la validación técnica del testbed desarrollado, es recomendable emplear esta plataforma de simulación como una herramienta de apoyo para el análisis y dimensionamiento de redes FTTH basadas en tecnología XGS-PON, particularmente en etapas de planificación y evaluación previa a su despliegue real. La posibilidad de contrastar métricas clave con los valores normativos definidos por la ITU-T permite reducir incertidumbre técnica y optimizar decisiones de diseño relacionadas con alcance, niveles de splitteo y márgenes de potencia.

Además, es recomendable añadir otros escenarios que consideren el tráfico bidireccional para los canales de bajada y subida de la tecnología XGS-PON, de modo que esto permitiría obtener una caracterización más completa del comportamiento del sistema en condiciones de carga variables, lo que permitiría realizar un análisis más profundo de la eficiencia y la escalabilidad de la tecnología en entornos de alta demanda.

A nivel tecnológico, resulta interesante utilizar este banco de pruebas como plataforma para el estudio de los procedimientos de migración de GPON o XG-PON a XGS-PON en escenarios de coexistencia más complejos que comprenden más tecnologías WDM-PON y un mayor número de usuarios, un punto de especial importancia para los operadores que desean mejorar sus redes sin tener que reemplazar por completo su infraestructura existente.

Finalmente, se sugiere integrar nuevas métricas de desempeño, tales como latencia, jitter y consumo energético, así como evaluar el impacto de parámetros avanzados asociados a la fibra óptica, con el propósito de fortalecer el alcance del análisis y adaptar el testbed a las tendencias emergentes en redes de acceso óptico de nueva generación.

## Bibliografía

171-Texto del artículo-396-1-10-20220326. (n.d.).

Bolaños Erazo, K. S. (2022). *DISEÑO DE UNA RED PASIVA ÓPTICA (PON) DE ARQUITECTURA FTTH BASADO EN LA TECNOLOGÍA XG-PON PARA LA EMPRESA ALFATEL EN LOS BARRIOS SAN MIGUEL Y SAN VICENTE DE LA PARROQUIA CRISTÓBAL COLÓN DE LA PROVINCIA DEL CARCHI.*

Universidad Técnica del Norte.

COFITEL. (2022, March 21). *Póster sobre el análisis de la fibra óptica de VIAVI |*

*Grupo COFITEL. Ventanas de Transmisión de Fibra Óptica.*

<https://www.c3comunicaciones.es/poster-sobre-el-analisis-de-la-fibra-optica-de-viavi/>

CommScope. (n.d.). *Singlemode devices enabling multiple PON generations to coexist on a common optical distribution network PON Coexistence Specification Guide.*

de Estudio, C., & Uit-t, del. (2005). *UIT-T Rec. G.983.1 (01/2005) Sistemas de acceso ptico de banda ancha basados en redes pticas pasivas.*

Del, T., Victoria, M., Montero, J., Lenin, S., & Carrión, R. (n.d.). *ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL "ANÁLISIS DE FACTORES QUE INFLUYEN EN LA Previa a la obtención del Título de: INGENIERO/A EN TELECOMUNICACIONES.*

Ellingson, S. W. (2020). *Electromagnetics, Volume 2. Electromagnetics, Volume 2.*

<https://doi.org/10.21061/ELECTROMAGNETICS-VOL-2>

Enrique Álvarez Ramos Roberto Pedro Duarte Zamorano Ezequiel Rodríguez Jáuregui

Santos Jesús Castillo, M. (n.d.). *Física II Tercera parte: Óptica.* Retrieved July 15, 2024, from <http://paginas.fisica.uson.mx/qb>

- G 984. (2008). *ITU-T Rec. G.984.1 (03/2008) Gigabit-capable passive optical networks (GPON): General characteristics.*
- G 987. (2016). *ITU-T 10-Gigabit-capable passive optical networks (XG-PON): General requirements.* <http://handle.itu.int/11.1002/1000/11>
- G 989. (2019). *ITU-T Rec. G.989.2 (02/2019) 40-Gigabit-capable passive optical networks 2 (NG-PON2): Physical media dependent (PMD) layer specification.* <http://handle.itu.int/11.1002/1000/>
- Goodson, R., & Zhang, D. (n.d.). *STUDY GROUP 15 TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR.*
- Grazzini, H. O. (2020). *Fibras ópticas: conceptos teóricos y aplicaciones prácticas.* Jorge Sarmiento Editor - Universitas. <https://elibro.net/es/lc/utnorte/titulos/175155>
- Hosecom. (2024, April 30). *¿Cuáles son las diferencias entre GPON, 10G-PON, XG-PON y XGS-PON?* <https://es.hosecom.com/pages/348>
- Howard, C. F. (2020, December 22). *Qué son los tipos de pérdidas en fibra y cómo calcular las pérdidas en fibra óptica ? | Comunidad FS. Tipos de Pérdida En Fibra Óptica.* <https://community.fs.com/es/article/understanding-fiber-loss-what-is-it-and-how-to-calculate-it.html>
- Huawei. (2023, September 5). *¿Qué es “XG-PON”?* XG-PON (10 Gigabit Passive Optical Network). <https://forum.huawei.com/enterprise/es/%C2%BFQu%C3%A9-es-XG-PON-y-en-qu%C3%A9-se-diferencia-de-GPON-en-la-red-de-acceso-de-Huawei/thread/698949989901942784-667212890693840896>
- ITU, R. (2014, November). *ITU-T Recommendation . Redes Ópticas Pasivas Con Capacidad de 40 Gigabits 2 (NG-PON2).* <https://www.itu.int/ITU-T/recommendations/rec.aspx?rec=12097&lang=es>

- ITU, R. (2023a). *G.9807.1 : Redes ópticas pasivas simétricas con capacidad de 10 Gigabit (XGS-PON)* (Issues 2023-07–06, pp. 1–290). Recomendación G.9807.1 (02/23). <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.9807.1-202302-I/es>
- ITU, R. (2023b). *G.9807.1 : Redes ópticas pasivas simétricas con capacidad de 10 Gigabit (XGS-PON)* (Issues 2023-07–06, pp. 1–290). Recomendación G.9807.1 (02/23). <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.9807.1-202302-I/es>
- Jhovana, U., & Tumiri, R. A. (2020). *PROYECTO DE GRADO ESTUDIO Y DISEÑO DE UNA RED DE FIBRA ÓPTICA PON-LAN PARA PROVEER SERVICIOS DE VOZ, VIDEO Y DATOS APLICADO A LA FACULTAD DE CIENCIAS PURAS Y NATURALES UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS (COTA COTA)*.
- LightOptics®. (n.d.). *Full Coexistence of GPON, XGS-PON, and NG-PON2* . Retrieved July 22, 2024, from <https://www.lightoptics.co.uk/blogs/news/full-coexistence-of-gpon-xgs-pon-and-ng-pon2>
- Montes, S. (2023, July 4). *Diferencias entre EPON, GPON, XGPON y XGSPON*. Ingeniería. <https://es.linkedin.com/pulse/diferencias-entre-epon-gpon-xgpon-y-xgspn-sebastian-montes>
- Nesset, D. (2017). PON Roadmap [Invited]. *Journal of Optical Communications and Networking, Vol. 9, Issue 1, Pp. A71-A76, 9(1), A71–A76*.  
<https://doi.org/10.1364/JOCN.9.000A71>
- Paqui Andrade, M. D. (2023). *“DISEÑO DE UNA RED FTTH UTILIZANDO EL ESTÁNDAR XGPON PARA MEJORAR LOS SERVICIOS DE INTERNET EN LA COMUNIDAD DE GUNUDEL EN SARAGURO.” ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO*.
- Paradiso, J. C. (2020). *TECNOLOGÍAS DE REDES PON. CePETel SECRETARÍA TÉCNICA Sindicato de Los Profesionales de Las Telecomunicaciones*.

- Reeves, J. (2024, June 21). *Understanding xgspon: Key Aspects of the Modern Optical Transceiver Technology* - *fibermall.com*. Fiber Mall.  
[https://www.fibermall.com/blog/xgspon.htm#How\\_is\\_Transmission\\_Managed\\_in\\_xgspon](https://www.fibermall.com/blog/xgspon.htm#How_is_Transmission_Managed_in_xgspon)
- Rodriguez, A. (2023, May 26). *¿Cuáles son los problemas de fibra óptica más comunes?* Fibra Óptica - Artículo. [https://www.fibraoptica hoy.com/cuales-son-los-problemas-de-fibra-optica-mas-comunes/#goog\\_rewarded](https://www.fibraoptica hoy.com/cuales-son-los-problemas-de-fibra-optica-mas-comunes/#goog_rewarded)
- Sofía, J., & Chamba, S. (2023). *Análisis técnico comparativo de las redes de acceso ng-pon1 versus ng-pon2*. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/25050>
- Telpro Madrid. (2021, November 7). *Fibra óptica y las Pérdidas de la Fibra Óptica - Telpro Madrid*. Fibra Óptica. [https://telpromadrid.eu/fibra-optica/#google\\_vignette](https://telpromadrid.eu/fibra-optica/#google_vignette)
- VERBEL SIERRA, A. A., & PERÉZ ÁLVAREZ, R. J. (2013). *ANÁLISIS Y DISEÑO DE UNA RED DE FIBRA AL HOGAR FTTH (FIBER TO THE HOME), A LA URBANIZACIÓN BARCELONA DE INDIAS*. UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR FACULTAD DE INGENIERÍA ESPECIALIZACIÓN EN TELECOMUNICACIONES.
- V-SOL. (2022, October 1). *Qué es PON (red óptica pasiva): . Tipos y Aplicaciones*.  
<https://es.vsolcn.com/blog/what-is-pon.html>
- XPONSHOP. (2024, June 21). *XGPON vs. XGSPON: Which is the Suitable 10G GPON Upgrade Solution-XponShop.com*. <https://www.xponshop.com/blogs/all-blogs/xgpon-xgspon-which-is-the-suitable-10g-gpon-upgrade-solution>

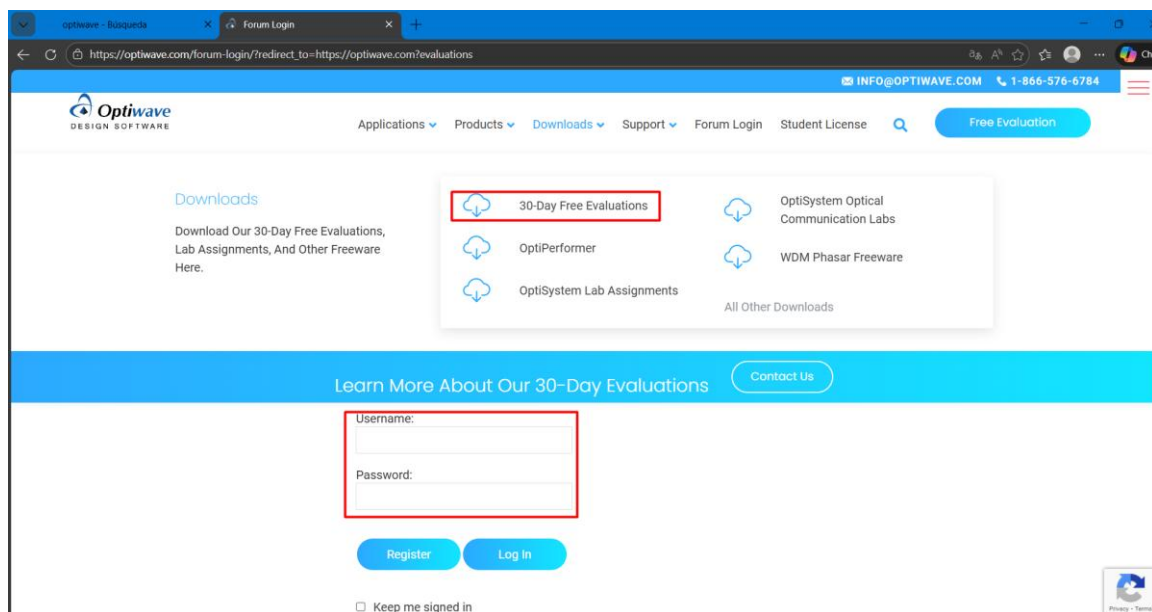
## Anexos

### Anexo 1. Instalación de Optisystem

Para iniciar la instalación del programa OptiSystem, es necesario descargar el software desde la página web oficial de Optiwave. Se debe ingresar al sitio oficial de la empresa y buscar la sección correspondiente al software OptiSystem, como se presenta en la Figura 49. Para acceder a la descarga, es recomendable crear una cuenta de usuario, lo cual permite obtener el instalador del programa. En caso de no contar con una licencia, también es posible solicitar una versión de prueba para fines académicos o de evaluación.

#### Figura 49

*Página web de descarga e inicio de sesión del software*



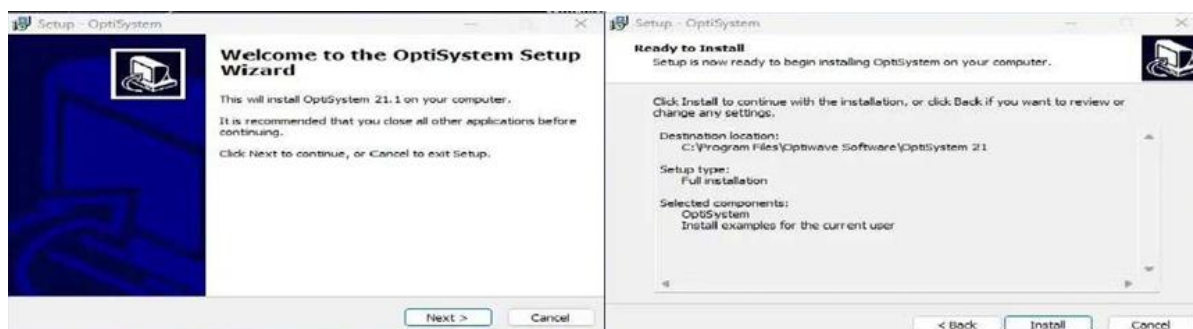
Antes de proceder con la instalación, es importante verificar que la computadora cumpla con los requisitos mínimos o recomendados del sistema, los cuales son identificados en la Tabla 36, y tienen como objetivo establecer el conjunto de recursos necesarios para que el sistema garantice su correcto funcionamiento.

**Tabla 36**  
*Requisitos mínimos y recomendados de instalación del Optisystem*

Requisito	Especificación mínima	Recomendación
Sistema operativo	Windows 10	Windows 10 o superior
Procesador	Intel Core i5 / AMD RYZEN 5	Intel i5 / Ryzen 5 o superior
Memoria RAM	8 GB	16 GB
Espacio en disco	5 GB disponibles	5 GB o más
Resolución de pantalla	1920 x 1080 p	1920 x 1080 p o superior

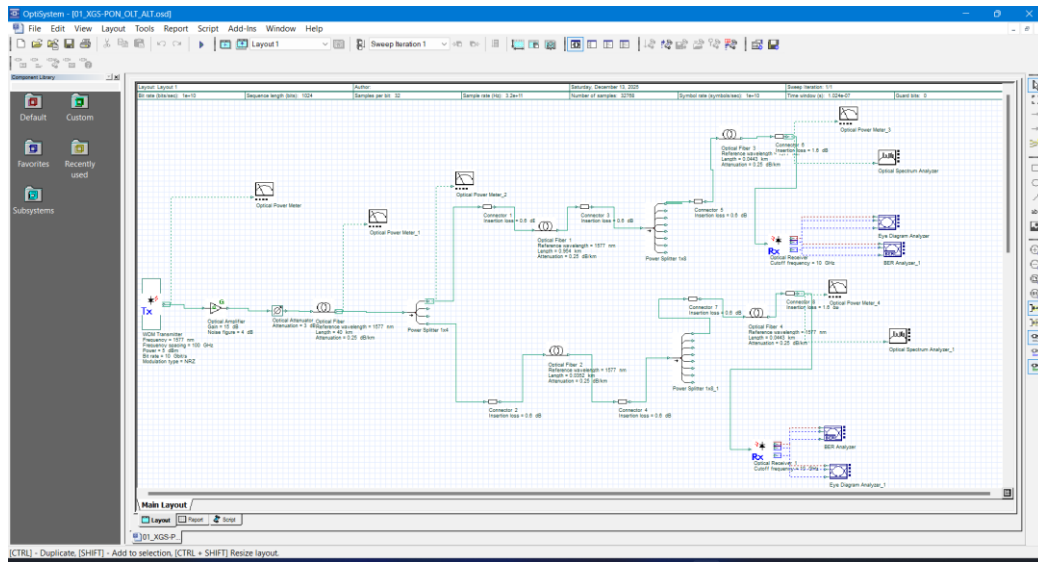
Una vez descargado el archivo de instalación, se debe ejecutar el archivo de extensión (.exe) haciendo doble clic sobre él. Posteriormente, se abrirá el asistente de instalación, el cual guiará al usuario a través de los diferentes pasos del proceso. Durante esta etapa, se debe seleccionar la ubicación donde se instalará el software, así como los componentes adicionales que se deseen incluir, como se observa en la Figura 50. Al finalizar el proceso, el programa OptiSystem quedará correctamente instalado en la computadora y listo para su uso.

**Figura 50**  
*Asistente de instalación del Optisystem*



Finalmente, es recomendable realizar una prueba de funcionamiento básica, como se ilustra en la **Figura 51**, con el fin de verificar que el funcionamiento del software, los componentes y módulos instalados operen de manera adecuada antes de iniciar proyectos de mayor complejidad.

**Figura 51**  
*Interfaz de Optisystem*



## ***Anexo 2 Cálculo de la potencia óptica promedio en modulación NRZ***

En los sistemas de comunicación óptica que utilizan modulación de intensidad, como la modulación NRZ (sin retorno a cero), utilizada en los transmisores WDM, la potencia óptica medida en la salida del transmisor no siempre se corresponde con la potencia máxima configurada del láser. Esto ocurre debido a que la señal óptica se modula digitalmente, alternando dos niveles de potencia correspondientes a los bits lógicos "1" y "0".

Los medidores ópticos tanto en simulaciones como en sistemas reales registran la potencia óptica promedio en el tiempo y no la potencia instantánea máxima, por ende, si el transmisor tiene un coeficiente de extinción limitado, la potencia medida es menor que la potencia nominal configurada. Este apéndice describe la base física del coeficiente de extinción y desarrolla un procedimiento matemático para determinar la potencia óptica promedio de una señal NRZ basada en este parámetro.

### **a) Modulación NRZ en sistemas ópticos**

En la modulación sin retorno a cero la señal óptica mantiene un nivel constante durante todo el periodo de bit, lo que conlleva a que la información digital se representa mediante dos niveles de potencia óptica correspondiente a la potencia óptica transmitida para el uno lógico denominado como  $P_1$  y a la vez potencia óptica transmitida para el cero lógico conocido como  $P_0$ .

Idealmente, el nivel del cero lógico debería corresponder a una potencia nula; sin embargo, debido a limitaciones físicas del modulador óptico, siempre existe una potencia residual. Como consecuencia, la señal presenta dos niveles de potencia distintos, pero no completamente separados, lo que genera que esta diferencia entre niveles se cuantifique mediante el extinction ratio.

### b) Extinction ratio

El extinction ratio conocido por sus siglas como ER es un parámetro de los transmisores ópticos que describe la capacidad del modulador para diferenciar entre los niveles lógico alto y bajo durante la transmisión de datos, de modo que este parámetro define la relación entre la potencia óptica del uno lógico ( $P_1$ ) y la potencia del cero lógico ( $P_0$ ), La fórmula (Ec. 7) representa matemáticamente el extinction ratio expresado en decibelios (dB).

$$ER (dB) = 10 \log_{10} \left( \frac{P_1}{P_0} \right) \quad (\text{Ec. 7})$$

Un extinction ratio elevado indica una mayor diferencia entre ambos niveles, lo que mejora la calidad de la señal y reduce errores de detección en el receptor. En contraste, si su valor es bajo implica que la potencia del nivel lógico “0” es significativa, incrementando la potencia promedio transmitida y reduciendo el contraste entre bits

A partir de la ecuación (Ec. 7), es posible expresar la potencia óptica del nivel lógico bajo en función del *extinction ratio* y de la potencia del nivel lógico alto. Para ello, primero se elimina el logaritmo aplicando la operación inversa, obteniendo la relación lineal entre las potencias ópticas, donde  $10^{ER/10} = \frac{P_1}{P_0}$ . Posteriormente, al despejar la potencia correspondiente al nivel lógico “0”, se obtiene la expresión mostrada en la ecuación (Ec. 8):

$$P_0 = P_1 10^{-\frac{ER}{10}} \quad (\text{Ec. 8})$$

Esta relación permite determinar la potencia óptica del nivel lógico bajo a partir de un valor conocido del *extinction ratio* y de la potencia del nivel lógico alto, lo cual resulta útil en el análisis del desempeño del transmisor óptico y en el cálculo de la potencia promedio transmitida.

### c) Potencia óptica promedio en modulación NRZ

En un sistema de modulación *Non Return to Zero*, si se asume una transmisión aleatoria de bits donde los niveles lógico de 1 y 0 tienen igual probabilidad de ocurrencia, la potencia óptica

promedio corresponde al valor medio temporal entre ambos niveles de potencia. Bajo esta consideración, la potencia óptica promedio puede expresarse mediante la fórmula (Ec. 9) donde  $P_1$  representa la potencia óptica asociada al nivel lógico alto y  $P_0$  la potencia correspondiente al nivel lógico bajo.

$$P_{avg} = \frac{P_1 + P_0}{2} \quad (\text{Ec. 9})$$

Sustituyendo la expresión (Ec. 9) previamente obtenida para  $P_0$  en función del *extinction ratio* de la ecuación (Ec. 8), se obtiene la ecuación (Ec. 10) :

$$P_{avg} = \frac{P_1 + P_1 10^{-ER/10}}{2} \quad (\text{Ec. 10})$$

Al factorizar la potencia del nivel lógico alto  $P_1$ , la expresión puede escribirse como la ecuación (Ec. 11), la cual representa la expresión general de la potencia óptica promedio en un transmisor NRZ, mostrando que dicho valor depende directamente del *extinction ratio*.

$$P_{avg} = P_1 \frac{1 + 10^{-ER/10}}{2} \quad (\text{Ec. 11})$$

#### d) Conversión a decibelios

Para evaluar la diferencia entre la potencia óptica pico correspondiente al nivel lógico “1” y la potencia óptica promedio, se expresa esta relación en decibelios mediante la ecuación (Ec. 12) .

$$\Delta P(dB) = 10 \log_{10} \left( \frac{P_{avg}}{P_1} \right) \quad (\text{Ec. 12})$$

Sustituyendo la relación obtenida para la potencia promedio (Ec. 11), se obtiene:

$$\Delta P(dB) = 10 \log_{10} \left( \frac{P_1 \frac{1 + 10^{-ER/10}}{2}}{P_1} \right) \quad (\text{Ec. 13})$$

$$\Delta P(dB) = 10 \log_{10} \left( \frac{1 + 10^{-ER/10}}{2} \right)$$

La expresión (Ec. 13) permite cuantificar la reducción existente entre la potencia pico y la potencia promedio transmitida, parámetro que resulta relevante en el análisis del presupuesto de potencia y en la evaluación del desempeño del transmisor óptico.

#### e) Aplicación al caso de estudio

Con el fin de aplicar las expresiones obtenidas al caso de estudio del transmisor WDM utilizado en los tres escenarios del testbed, los cuales considera un extinction ratio del transmisor igual a 10 dB. Este valor se adopta debido a que corresponde a un valor de referencia de operación en transmisores ópticos modulados externa y directamente modulados empleados en sistemas WDM y redes ópticas de acceso, donde valores entre 8 dB y 12 dB garantizan la eficiencia de modulación, calidad de señal y potencia óptica promedio transmitida.

Al sustituir este valor en la ecuación de la potencia óptica promedio (Ec. 11), se tiene:

$$P_{avg} = P_1 \frac{1 + 10^{-10/10}}{2} = 0.55 P_1 \quad (\text{Ec. 14})$$

El resultado obtenido de la ecuación (Ec. 14) establece que la potencia óptica promedio corresponde al 55 % de la potencia óptica del nivel lógico uno. Expresando esta relación en decibelios de la ecuación (Ec. 13), la diferencia entre la potencia pico y la potencia promedio resulta:

$$\Delta P(dB) = 10 \log_{10} \left( \frac{1 + 10^{-\frac{ER}{10}}}{2} \right) \quad (\text{Ec. 15})$$

$$\Delta P(dB) = 10 \log_{10} \left( \frac{1 + 10^{-\frac{10}{10}}}{2} \right) = -2.596 \text{ dB}$$

Este resultado obtenido de la (Ec. 15) indica que la potencia óptica promedio es 2.596 dB menor que la potencia óptica correspondiente al nivel lógico alto. Debido a que esta diferencia se obtiene como un valor negativo, se interpreta como una reducción de potencia asociada a la naturaleza de la modulación NRZ y al valor finito de la relación de extinción del transmisor. Por tanto, la potencia óptica promedio puede expresarse en la ecuación (Ec. 16), donde  $P_{Tx}$  corresponde a la potencia óptica configurada en el transmisor y  $\Delta P$  representa la diferencia entre la potencia pico y la potencia promedio.

$$\Delta P(dB) = P_{Tx}(dBm) + \Delta P(dB) \quad (\text{Ec. 16})$$

Previo al cálculo de la variación de potencia óptica, es necesario definir los parámetros involucrados en la ecuación (Ec. 17), en donde la potencia óptica del transmisor  $P_{Tx}$  posee un valor es de 5 dBm y  $\Delta P$  posee un valor de -2.596 dB, de modo que estos valores permiten determinar la potencia óptica efectiva utilizada en la (Ec. 17) para determinar la potencia que ingresa a la red fibra óptica de los tres escenarios del testbed.

$$\Delta P(dB) = 5 \text{ dBm} + (-2.596 \text{ dB}) = 2.404 \text{ dBm} \quad (\text{Ec. 17})$$

El resultado obtenido de la ecuación (Ec. 17) indica que la potencia óptica medida a la salida del transmisor WDM corresponde a la potencia óptica promedio de la señal modulada y no a la potencia pico configurada en el láser, lo que conlleva a que la reducción de 2.596 dB se debe al efecto propio de la modulación NRZ y a la relación de extinción finita del transmisor, la cual establece la diferencia entre los niveles ópticos correspondientes a los bits lógicos.

En conclusión, el valor obtenido de 2.404 dBm representa la potencia óptica promedio efectiva transmitida por el canal WDM, siendo coherente con los valores observados en la simulación de los tres escenarios y confirmando que la diferencia respecto a la potencia configurada no corresponde a pérdidas del enlace óptico sino al comportamiento inherente del proceso de modulación.

### **Anexo 3 Cálculo de la pérdida de potencia total**

La pérdida de potencia total del enlace consiste en determinar la atenuación total que experimenta la señal óptica durante su propagación desde la salida del transmisor hasta la entrada del receptor, lo que conlleva a que esta pérdida sea causada principalmente por la atenuación de la fibra, así como por los elementos pasivos presentes en la red, tales como empalmes, conectores y divisores ópticos. Identificar el valor de esta magnitud permite conocer la reducción de la potencia a lo largo del enlace permitiendo evaluar el desempeño del sistema, ya que define la potencia óptica disponible en el receptor y permite verificar la viabilidad técnica de la transmisión.

La ecuación (Ec. 18) presenta los parámetros que permiten determinar la pérdida de potencia total del enlace óptico, la expresión está conformada por la pérdida debida a la fibra óptica ( $L \cdot \alpha$ ), donde  $L$  representa la longitud total del enlace en kilómetros y  $\alpha$  corresponde al coeficiente de atenuación de la fibra expresado en dB/km, de igual manera el parámetro  $P_{emp}$  representa la pérdida acumulada generada por los empalmes por fusión presentes en el enlace, mientras que  $P_{con}$  indica las pérdidas generadas por los conectores ópticos debido a desalineaciones e imperfecciones en las interfaces de conexión.

Por su parte,  $P_{split}$  representa la pérdida causada por el divisor óptico, elemento que distribuye la potencia óptica entre múltiples usuarios en redes de acceso. Finalmente, el parámetro denominado  $P_{otros}$  agrupa pérdidas adicionales en el sistema, tales como márgenes de diseño, envejecimiento de los componentes o pérdidas no consideradas explícitamente en los términos anteriores, de modo que la suma de todos estos parámetros permite obtener la atenuación total del enlace óptico, expresada en decibelios.

$$P_{total}(dB) = (L * \alpha) + P_{emp} + P_{con} + P_{split} + P_{otros} \quad \text{(Ec. 18)}$$

#### Anexo 4. Cálculo de la potencia óptica recibida

La potencia óptica recibida o también denominada potencia en el receptor representa la potencia óptica disponible a la entrada del receptor una vez que la señal ha atravesado todos los elementos del enlace óptico y ha experimentado todas sus atenuaciones. Adicionalmente, la determinación de este parámetro permite verificar que el nivel de señal que llega al receptor sea suficiente para garantizar una correcta detección de la información transmitida, de modo que el valor obtenido permite evaluar el correcto funcionamiento del enlace y comprobar que la potencia disponible se mantiene por encima del nivel mínimo requerido por la sensibilidad del receptor.

La expresión (Ec. 18) presentan los parámetros que permiten determinar la potencia óptica disponible en el receptor, en los cuales el primer parámetro  $P_{rx}$  corresponde a la potencia óptica recibida, expresada en dBm, y representa el nivel de señal que llega a la entrada del receptor óptico. Por su parte, el segundo parámetro  $P_{tx}$  indica la potencia óptica promedio de transmisión configurada en el transmisor, también expresada en dBm, la cual constituye la potencia inicial disponible para la propagación de la señal a través del enlace. Finalmente,  $P_{total}$  representa la pérdida total del enlace óptico, expresada en decibelios (dB), e incluye la suma de las atenuaciones producidas por la fibra óptica

$$P_{rx} = P_{tx} - P_{total} \quad (\text{Ec. 19})$$

**Tabla 29**

*Tabla de pérdidas totales del enlace de fibra óptica del usuario cercano*

Elemento	Cantidad	Pérdida unitaria	Pérdida total
Extinction ratio	1	-2.596 dB	$P_{otros}$
Fibra óptica (km)	3 km	0.25 dB/Km	$(L * \alpha)$
Empalmes por fusión	3	0.1 dB	$P_{emp}$
Conectores	2	0.6 dB	$P_{con}$
Atenuador óptico	1	3 dB	$P_{otros}$

Splitter 1x4	1	7 dB	$P_{split}$
Splitter 1x8	1	11 dB	$P_{split}$
Fibra óptica (km)	0.075 km	0.25 dB/Km	$(L * \alpha)$

Reemplazando los valores de la Tabla 28 en la ecuación del cálculo de la potencial total de la (Ec. 18), se obtiene la expresión (Ec. 6).

$$\begin{aligned}
 P_{total}(dB) &= (L * \alpha) + P_{emp} + P_{con} + P_{split} + P_{otros} \\
 P_{total}(dB) &= (3km * 0.25 \text{ dB/Km}) + (0.075km * 0.25 \text{ dB/Km}) \\
 &\quad + (3 * 0.1 \text{ dB}) + (2 * 0.6 \text{ dB}) + (1 * 7 \text{ dB}) + (1 * 11 \text{ dB}) \quad \text{(Ec. 20)} \\
 &\quad + (2.596 \text{ dB} + (1 * 3 \text{ dB})) \\
 P_{total}(dB) &= -25.87 \text{ dB}
 \end{aligned}$$

A partir de las pérdidas totales del enlace previamente determinadas y considerando la potencia de salida de la OLT, se realizó el cálculo del presupuesto de potencia teórico para el usuario cercano. Este cálculo permite estimar el nivel de potencia óptica que llega a la ONT en un entorno de coexistencia XG-PON / XGS-PON. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 29.

**Tabla 30**  
*Resultado del presupuesto de potencia en la ONT del usuario cercano*

Concepto	Valor
Potencia de salida OLT	+5 dBm
Pérdidas totales de la red	-25.87 dB
<b>Potencia estimada en ONT</b>	<b>-20.87 dBm</b>

De manera similar, se efectuó el cálculo de las pérdidas totales del enlace para el usuario más lejano, ubicado a una distancia adicional de 975 m desde el punto de distribución. Aunque la topología de la red y los elementos pasivos se mantienen constantes respecto al usuario cercano, la mayor longitud del tramo final de fibra óptica genera un incremento en las pérdidas acumuladas del enlace. El detalle de este cálculo se presenta en la Tabla 30.

**Tabla 31***Tabla de pérdidas totales del enlace de fibra óptica del usuario más lejano*

<b>Elemento</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Pérdida unitaria</b>	<b>Pérdida total</b>
Extinction ratio	1	-2.596 dB	-2.596 dB
Fibra óptica (km)	3 km	0.25 dB/Km	-0.75 dB
Empalmes por fusión	3	0.1 dB	-0.3 dB
Conectores	2	0.6 dB	-1.2 dB
Atenuador óptico	1	3 dB	-3 dB
Splitter 1x4	1	7 dB	-7 dB
Splitter 1x8	1	11 dB	-11 dB
Fibra óptica (km)	0.975 km	0.25 dB/Km	-0.244 dB
<b>Total</b>			<b>-26.1 dB</b>