

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

### **ANÁLISIS TÉCNICO COMPARATIVO DE LAS REDES DE ACCESO NG-PON1 VERSUS NG-PON2**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO  
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA EN  
TELECOMUNICACIONES**

**JOHANNA SOFIA SORIA CHAMBA**

**johanna.soria@epn.edu.ec**

**DIRECTOR: Ing. CHRISTIAN JOSÉ TIPANTUÑA TENELEMA, PhD.**

**christian.tipantuna@epn.edu.ec**

**DMQ, octubre 2023**

## **CERTIFICACIONES**

Yo, JOHANNA SOFIA SORIA CHAMBA declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

---

**Johanna Sofia Soria Chamba**

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Johanna Sofia Soria Chamba, bajo mi supervisión.

---

**Christian José Tipantuña Tenelema, PhD.**

**DIRECTOR**

## **DECLARACIÓN DE AUTORÍA**

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

JOHANNA SOFIA SORIA CHAMBA

CHRISTIAN JOSÉ TIPANTUÑA TENELEMA, PHD

## DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios, quien ha sido mi luz y soporte en mis momentos más difíciles, sosteniendo mi mano y ayudándome a atravesarlos.

A mis padres, Raquel y Marcelino, les amo profundamente y agradezco todo lo que han hecho por mí. Hoy entiendo que todo es perfecto tal y como fue, y eso me ha convertido en la persona que soy y me ayudará a llegar a ser lo que deseo.

A mi hermanita Janice, a quien adoro, y quien ha sido una gran compañera de vida. Hemos compartido buenos y malos momentos, y has hecho de mi vida un lugar más feliz y llevadero.

A toda mi familia materna, quienes han sido un soporte fundamental en este proceso. Nunca olvidaré que ustedes han sido parte importante en la consecución de esta meta y han sido una gran bendición en mi vida.

A la pequeña Sofía, a quien quiero con todo mi corazón, y en cuyos ojos veo un futuro lleno de posibilidades.

A todos mis amigos, profesores, y seres queridos que han influido en mi desarrollo académico, profesional y personal, les agradezco sinceramente por su apoyo, aliento y contribuciones.

Este logro es el resultado del amor, apoyo y compañía de todos ustedes. Gracias por ser parte de este viaje.

Con cariño y gratitud.

*Sofía Soria*

## AGRADECIMIENTO

En este espacio, quiero expresar mi profunda gratitud a todas las fuentes de apoyo y motivación que me han permitido alcanzar este importante logro.

En primer lugar, agradezco a Dios y a la vida por las oportunidades y los desafíos que me han ayudado a crecer y llegar hasta aquí.

A mis padres y toda mi familia, les debo un agradecimiento eterno. Su amor, apoyo incondicional y sacrificios han allanado el camino para que pueda alcanzar mis metas. Comprender que todo lo que han hecho por mí es un regalo que nunca podré devolver por completo.

Un agradecimiento especial se dirige a mi tutor de tesis, el Ingeniero Christian Tipantuña, quien ha sido una presencia constante a lo largo de esta etapa. Su guía experta, apoyo constante y paciencia infinita me han permitido culminar este proyecto.

A todas esas personas increíbles que he tenido el privilegio de conocer en mi camino: compañeros de trabajo y compañeros de universidad, quiero expresar mi agradecimiento. Su motivación, colaboración y apoyo incondicional han sido un pilar fundamental durante este proceso.

Este logro es el resultado de la contribución de muchas personas maravillosas en mi vida. Gracias a todos por ser parte de esta hermosa experiencia.

*Sofía Soria*

## INDICE DE CONTENIDO

<b>CERTIFICACIONES</b> .....	<b>I</b>
<b>DECLARACIÓN DE AUTORÍA</b> .....	<b>II</b>
<b>DEDICATORIA</b> .....	<b>III</b>
<b>AGRADECIMIENTO</b> .....	<b>IV</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>VIII</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>IX</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1 OBJETIVO GENERAL .....	2
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
1.3 ALCANCE.....	3
<b>1.4 MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>3</b>
1.4.1 REDES DE ACCESO ÓPTICAS ACTIVAS VS PASIVAS.....	4
1.4.2 TECNOLOGÍAS DE TRANSMISIÓN DE SEÑAL .....	5
1.4.2.1 Multiplexación por división de tiempo PON (TDM-PON).....	5
1.4.2.2 Multiplexación por división de longitud de onda pon (WDM-PON). 6	6
1.4.2.3 OFDM PON .....	7
1.4.2.4 Tecnologías híbridas .....	8
1.4.3 REDES DE ACCESO FTTx.....	10
1.4.3.1 Elementos de una red PON .....	11
1.4.4 EVOLUCIÓN PONs .....	12
1.4.4.1 APON (Asynchronous Transfer Passive Optical Network) 12	12
1.4.4.2 BPON (Broadband PON).....	13
1.4.4.3 GPON (Gigabit Passive Optical Network) .....	13
1.4.4.4 EPON.....	13
1.4.4.5 NG-PON1 .....	13
1.4.4.6 NG-PON2 .....	14
<b>2. METODOLOGÍA</b> .....	<b>15</b>
2.1 Tecnología XGS-PON .....	16
2.1.1 ARQUITECTURA DE LA RED DE ACCESO ÓPTICO .....	16
2.1.2 Configuración de referencia .....	16

2.1.3	tasas de transmisión .....	17
2.1.4	Niveles de potencia óptica .....	17
2.1.5	Plan de longitudes de onda .....	18
2.1.6	Parámetros de distancia .....	18
2.1.7	Relación de división .....	19
2.1.8	Estructura en capas de la red óptica XGS-PON.....	20
2.1.9	<b>ESCENARIOS DE COEXISTENCIA DE XGS-PON CON GENERACIONES HEREDADAS .....</b>	<b>21</b>
2.1.10	Escenario de coexistencia de G-PON, XGS-PON y video RF... 23	23
2.1.10.1	Escenario de coexistencia de XGS-PON, XG-PON - video RF	23
2.1.10.2	Escenario de coexistencia de XG-PON y XGS-PON .....	25
2.1.10.3	Escenario de coexistencia de XGS-PON, XG-PON, GPON y video RF .....	25
2.1.10.4	Escenarios de migración de XGS-PON .....	26
2.1.11	Beneficios de XGS-PON .....	27
2.2	DESCRIPCIÓN GENERAL DE NG-PON2.....	29
2.2.1	Arquitectura de la red de acceso óptico .....	29
2.2.2	Configuración de referencia .....	29
2.2.3	tasas de transmisión .....	30
2.2.4	Niveles de potencia óptica .....	30
2.2.5	Plan de longitudes de onda .....	32
2.2.6	Parámetros de distancia .....	33
2.2.7	Relación de división .....	34
2.2.8	Tecnología NG-PON2.....	34
2.2.9	<b>ESCENARIOS DE COEXISTENCIA DE NG-PON2 CON GENERACIONES ANTERIORES .....</b>	<b>35</b>
2.2.10	<b>ESCENARIOS DE MIGRACIÓN DE NG-PON2 .....</b>	<b>37</b>
2.2.11	<b>BENEFICIOS DE NG-PON2.....</b>	<b>37</b>
3.	<b>RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>39</b>
3.1	ANÁLISIS.....	39
3.1.1	<b>ANÁLISIS TÉCNICO COMPARATIVO ENTRES LAS REDES DE ACCESO XGS-PON Y NG-PON2 .....</b>	<b>39</b>

3.1.1.1	Análisis de arquitectura y funcionamiento.....	40
3.1.1.2	Análisis de velocidades de transmisión. ....	41
3.1.1.3	Análisis de alcance .....	41
3.1.1.4	Comparación de longitudes de onda de operación.....	41
3.1.1.5	Análisis fibra óptica .....	42
3.1.1.6	Análisis de relación de división de los splitters .....	42
3.1.1.7	Análisis servicios soportados .....	42
3.1.1.8	Análisis de niveles de potencia OLT y ONU .....	43
3.1.1.9	Análisis de clases de ODN.....	44
3.2	CONCLUSIONES.....	46
3.3	RECOMENDACIONES .....	47
3.4	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	49

## RESUMEN

El presente trabajo de integración curricular tiene por finalidad establecer un análisis técnico comparativo entre las redes de acceso ópticas (PON: Passive Optical Network) de nueva generación NG-PON1 y NG-PON2, cuyo propósito es abastecer la creciente demanda de ancho de banda en los accesos a Internet de los usuarios finales. El presente trabajo está dividido en tres capítulos.

El capítulo uno se basa en un compendio de temas introductorios sobre tecnologías ópticas que además incluye un breve recorrido histórico sobre los estándares PON desarrollados hasta las tecnologías PON más recientes.

En el segundo capítulo se presenta un análisis sobre características técnicas para NG-PON1 y NG-PON2. Este análisis se apoya en las recomendaciones de las redes de acceso de servicio completo (FSAN: Full Service Access Network) estandarizadas por medio de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU: International Telecommunication Union), a fin de establecer los parámetros que mantiene cada tecnología en cuanto a la capa física (PMD: Physical Medium Dependent), capa de convergencia de transmisión (TC: Transmission Convergence) y la especificación de la interfaz de gestión y control de la ONU (OMCI: ONT Management and Control Interface).

En el tercer capítulo, se establece una síntesis y análisis comparativo de parámetros técnicos que definen el desempeño del sistema de comunicaciones óptico de cada tecnología como: presupuesto de potencia, nivel de splitting, velocidad de transmisión, distancia del enlace, flexibilidad espectral, técnicas de transporte de datos, etc. Además, se plantean escenarios que permiten la migración y coexistencia entre tecnologías de nueva generación NG-PON1 y NG-PON2 con la infraestructura heredada de las redes de acceso ópticas con capacidad de gigabit (GPON: Gigabit-Capable Passive Optical Network). Finalmente, se presenta una síntesis de las conclusiones y recomendaciones obtenidas durante el desarrollo del presente trabajo.

**PALABRAS CLAVE:** ODN, GPON, NG-PON1, NG-PON2, multiplexación, *splitting*.

## ABSTRACT

The purpose of this study is to establish a comparative technical analysis between the new generation optical access networks NG-PON1 and NG-PON2, whose purpose is to supply the growing demand for bandwidth in Internet access by end users.

Chapter one is based on a compendium of introductory topics on optical technologies that also includes a brief historical overview of the developed PON standards up to the most recent PON technologies.

In the second chapter, an analysis of the technical characteristics for NG-PON1 and NG-PON2 will be presented. This analysis will be based on the recommendations of the FSAN (*Full-Service Access Network*) standardized by the ITU (*International Telecommunication Union*) to establish the parameters that each technology maintains in terms of the physical layer (PMD: *Physical Medium Dependent*), transmission convergence layer (TC: *Transmission Convergence*) and the combinations of the ONU management and control interface (OMCI, *ONT Management and control interface*).

In the third chapter, a synthesis and comparative analysis of technical parameters that define the performance of the optical communications system of each technology is established, such as: power budget, splitting level, transmission speed, link distance, spectral flexibility, communication techniques. data transport etc. In addition, scenarios will be proposed that will allow the migration and coexistence between new generation technologies NG-PON1 and NG-PON2 with the infrastructure inherited from GPON (*Gigabit-Capable Passive Optical Network*). Finally, will present a synthesis of the conclusions and recommendations obtained during the development of this work.

**KEY WORDS:** ODN, GPON, NG-PON1, NG-PON2, *multiplexing, splitting*.

# 1. INTRODUCCIÓN

Desde los inicios de Internet, el consumo de ancho de banda ha crecido gradualmente. El índice de redes visuales (VNI: Visual Networking Index) presentado por Cisco, que el número total de usuarios de Internet aumente de 3900 millones en 2018 a 5300 millones en 2023 con una tasa de crecimiento anual compuesta (CAGR: Compound Annual Growth Rate) del 6 %. En términos de población, esto representa el 51 % de la población mundial en 2018 y el 66 % de la penetración de la población mundial en 2023 [1]. El tráfico IP aumenta significativamente cada año favorecido por la aparición de nuevos servicios digitales emergentes como por ejemplo el video bajo demanda (VoD: Video on Demand), televisión por protocolo de Internet (IPTV: Internet Protocol Television), servicios de computación en la nube, e-learning, conexiones (M2M: Machine to Machine) también denominadas Internet de las cosas (IoT: Internet of Things). Otra razón del crecimiento del tráfico de Internet es la implementación y adopción de fibra hasta el hogar (FTTH: Fiber-To-The-Home), líneas de suscripción digitales (DSL: Digital subscriber line) de alta velocidad y adopción de banda ancha por cable, como, así como la penetración general de banda ancha [1].

Las redes inalámbricas con teléfonos móviles, tablets y otros dispositivos inalámbricos son responsables de un enorme crecimiento en el tráfico de Internet, pero la fibra óptica sigue siendo el candidato más prometedor para satisfacer cualquier tráfico de datos previsible. En el Ecuador el número de suscriptores al servicio de Internet fijo es de 2,693.705 siendo la fibra óptica la tecnología predominante [2]. Debido a su gran aceptación a nivel mundial, la red de acceso óptico es la forma más preparada para mejorar en un futuro el rendimiento de la red y satisfacer eficazmente las demandas de los usuarios de servicios de banda ancha. En la actualidad la tecnología predominante sobre el despliegue de FTTH es la Red Óptica Pasiva con Capacidad de Gigabit (GPON: Gigabit Capable Passive Optical Network) [2]. Esta tecnología proporciona 2,5 Gbps de ancho de banda descendente y 1,25 Gbps ascendente dividido por la relación de división para cada cliente. Aunque se considera que los sistemas GPON pueden proporcionar suficiente capacidad para los próximos años, en un futuro deberán migrar hacia soluciones con mayores capacidades de transmisión [4].

Con la finalidad de adelantarse a las futuras demandas de mayor ancho de banda, principales organismos de estandarización como las redes de acceso de servicio completo (FSAN: Full Service Access Network), de manera conjunta con la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU: International Telecommunication Union), definieron dos

candidatos denominados redes ópticas pasivas de nueva generación (NG-PON: Next Generation PON) como sucesores de GPON.

El primer candidato NG-PON1 se definió en la recomendación ITU-T G.987 aprobada en el año 2010. Esta tecnología ofrece una velocidad de transmisión de 10 Gbps para enlace descendente y 2.5 Gbps para enlace ascendente [5]. El siguiente candidato NG-PON2 aprobado en 2015 se definió mediante la recomendación ITU-T G.989. Este sistema admite capacidades de hasta 40 Gbps para enlace descendente y 10 Gbps para enlace ascendente [6].

El presente trabajo de integración curricular propone un análisis técnico comparativo entre las tecnologías de acceso ópticas de nueva generación NG-PON1 y NG-PON2. Este análisis pretende establecer los beneficios que supondría la implementación de cada tecnología, así como también sus limitaciones asociadas, considerado parámetros importantes que definen su desempeño como: el presupuesto de potencia, nivel de splitting, arquitectura de red, flexibilidad espectral, rango de cobertura, etc. Además, se analiza la coexistencia de cada una de estas tecnologías con GPON, dado que la infraestructura de fibra implementada para GPON deberá ser reutilizable durante un tiempo considerable y permitirá la migración gradual de los suscriptores hacia los sistemas de nueva generación mencionados.

El resultado final de este análisis podrá complementarse con futuros estudios de factibilidad a fin de establecer la solución que mejor se adapte a las demandas del mercado y así definir la opción más viable hacia el próximo salto en la evolución de las redes PON.

## **1.1 OBJETIVO GENERAL**

Establecer un análisis técnico comparativo entre las tecnologías de acceso ópticas pasivas NG-PON1 y NG-PON2.

## **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

2. Describir la evolución de las tecnologías de acceso PON.
3. Estudiar las tecnologías NG-PON1 (ITU-T G.987), NG-PON2 (ITU-T G.989) en cuanto a su arquitectura, capa física, mecanismos de gestión y control en las capas superiores.
4. Contrastar las tecnologías de acceso NG-PON1 y NG-PON2 en base a parámetros que definen su desempeño como potencia, nivel de splitting, cobertura, flexibilidad

espectral, etc., empleando gráficos, tablas e indicadores que faciliten su interpretación.

5. Presentar algunos esquemas de convivencia de las tecnologías NG-PON1 y NG-PON2 con GPON, desarrollados a nivel mundial por diferentes institutos de investigación.

### **1.3 ALCANCE**

El presente trabajo de integración curricular establece un análisis técnico comparativo entre las tecnologías de acceso NG-PON1 y NG-PON2; para ello se presenta una breve introducción sobre la evolución de las tecnologías PON, en donde se manifiesta las razones por las cuales surgió la creación de cada una de las tecnologías presentadas por los organismos reguladores como ITU e IEEE.

Se discuten las características de cada una de las tecnologías NG-PON1 y NG-PON2 en cuanto a su arquitectura, mecanismos de acceso al medio, presupuestos de enlace, velocidades de transmisión, longitudes de onda asignadas para su operación. Se revisan aspectos de la capa física PMD (PMD: Physical Medium Dependent), así como también la subcapa de convergencia (TC: Transmission Convergence). Además, se identifica la conformación de las tramas, la función de los mensajes PLOAM (PLOAM: Physical Layer Operation Administration and Maintenance) en la comunicación entre la terminal de línea óptica (OLT: Optical Line Terminal) y la terminal de red óptica (ONT: Optical Network Terminal).

A continuación, se realiza un análisis técnico comparativo entre los estándares ITU-T G.987 (NG-PON1) e ITU-T G.989 (NG-PON2), en donde se discute sobre los parámetros más destacables de cada tecnología, ventajas o limitaciones de su implementación, la fiabilidad de cada tecnología en función de su tolerancia a fallas y mecanismos de supervivencia empleados. Finalmente se presentarán algunos esquemas desarrollados por institutos de investigación a nivel mundial, que incluyen escenarios sobre la coexistencia de NG-PON1 y NG-PON2 en ambientes GPON. En el presente trabajo no se incluye un diseño de red NG-PON1, NG-PON2, ni un estudio de factibilidad, tampoco se genera un producto final demostrable.

### **1.4 MARCO TEÓRICO**

La red de acceso óptico es la forma más preparada para el futuro capaz de mejorar ampliamente el rendimiento de la red y satisfacer eficazmente las demandas de servicios de ancho de banda crecientes; además permite enviar gran cantidad de datos a distancias

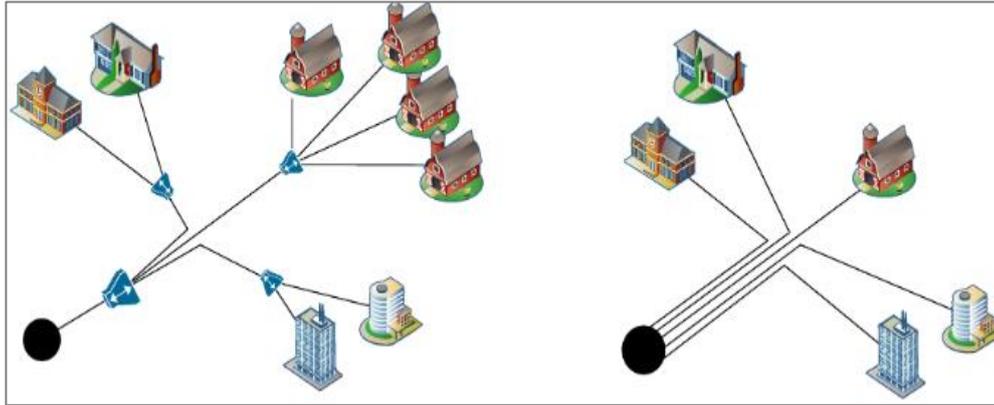
de algunas decenas de kilómetros [2]. Si bien estas capacidades eran reservadas para la red de transporte con el tiempo fueron adoptadas en las redes de acceso para segmentos empresariales y residenciales. A lo largo del presente trabajo de titulación se mencionan conceptos y definiciones que permiten entender el desarrollo de este proyecto, por lo que este capítulo se dedica enteramente a aclarar estos fundamentos básicos.

#### **1.4.1 REDES DE ACCESO ÓPTICAS ACTIVAS VS PASIVAS**

Las redes de telecomunicaciones mantienen un diseño jerárquico con el objetivo de separar las características y funciones que cada nivel debe ofrecer. Por tanto, se han definido tres niveles: red troncal o backbone, red metropolitana y red de acceso. Una red troncal se emplea para el transporte de tráfico de larga distancia, una red metropolitana proporciona capacidad de integración de múltiples servicios, gestionando un mayor tráfico agregado. Una red de acceso tiene como finalidad brindar conectividad a los usuarios finales con su proveedor de servicios inmediato, esta conectividad al servicio se realiza mediante un sistema denominado FTTx donde: x, representa que tan cercano se encuentra el despliegue de la fibra al usuario. Este tipo de redes transportan un menor tráfico de datos en comparación con las redes troncales y metropolitana [2].

Las redes de acceso pueden ser Punto a Punto (PtP: Point to Point) o Punto Multipunto (P2MP: Point to Multi Point) como se puede observar en la Figura 1.1. Una topología PtP, ofrece mayores anchos de banda, ya que a cada abonado se le ofrece una línea dedicada para conectarse a la oficina central, este esquema es recomendado para ambientes empresariales. En una topología P2MP la información es transportada través de un cable de fibra óptica que brinda servicios a múltiples abonados, para conseguir que cada usuario reciba el contenido que le pertenece, se acude a diferentes técnicas de multiplexación de datos. Esta tecnología ha sido pensada para brindar servicios a usuarios residenciales cuyas necesidades de ancho de banda son moderadas [2].

Una red PON es un tipo particular de redes FTTx que utilizan una topología P2MP. En este tipo de arquitectura no se requiere de equipos de alimentación eléctrica en la red de distribución, en su lugar se emplean elementos pasivos como los splitters o divisores de potencia ópticos ver. En comparación con una red óptica activa (AON: Active Optical Network) donde un hilo de fibra dedicado es dirigido a cada casa o condominio desde el punto de demarcación, empleando topología PtP y requieren de equipos con alimentación eléctrica para distribuir las señales a los suscriptores [8].



**Figura 1.1.** Topología PON, esquema punto P2MP y esquema PtP [2]

Los sistemas PON pasivos han sido ampliamente desplegados ya que presentan ventajas y mejoras con respecto a los activos. Los costos de inversión inicial en el despliegue CAPEX (Capital Expenditures) y los costos de operación OPEX (Operating Expenditures) se reducen por el empleo de elementos pasivos en la red de distribución que además reducen el consumo de energía [2].

#### **1.4.2 TECNOLOGÍAS DE TRANSMISIÓN DE SEÑAL**

Para la transmisión de señales se han contemplado diferentes arquitecturas cuyas características, ventajas y limitaciones se describen a continuación:

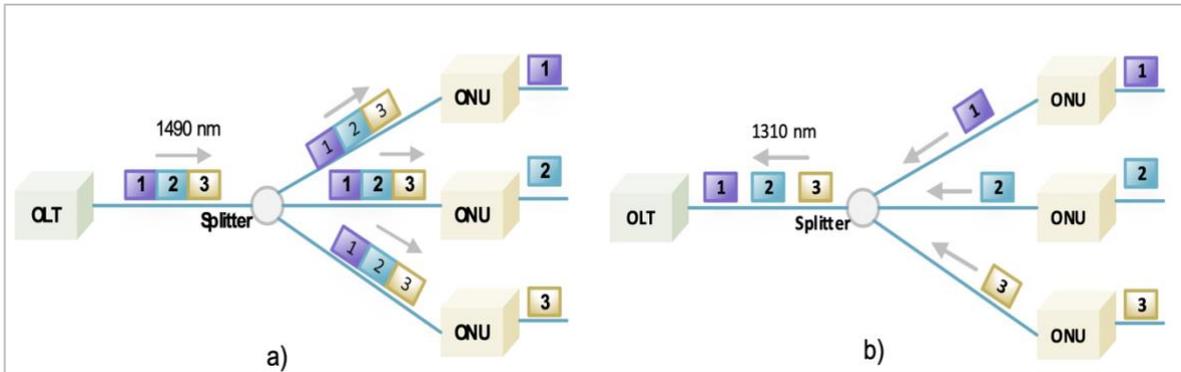
##### **1.4.2.1 MULTIPLEXACIÓN POR DIVISIÓN DE TIEMPO PON (TDM-PON).**

La tecnología TDM-PON se basa en la utilización de un divisor de potencia pasivo, conocido como splitter, para repartir la potencia de la señal entrante entre las diversas ONUs interconectadas. Este enfoque implica la transmisión de información a través de una única longitud de onda. En la dirección descendente ver Figura 1.2 a), los datos se difunden a todas las ONUs mediante una transmisión de tipo broadcast. En contraste, en la dirección ascendente ver Figura 1.2 b), cada ONU transmite en modo ráfaga, lo que conlleva la necesidad de contar con mecanismos de arbitraje para evitar la superposición de paquetes en intervalos temporales específicos [9].

Para lograr una comunicación bidireccional, se exploran dos esquemas alternativos. Uno de ellos implica el uso de una única fibra para transmitir utilizando dos longitudes de onda distintas. El segundo método considera la utilización de dos fibras independientes para llevar a cabo la transmisión en una misma longitud de onda [9].

Una de las ventajas de la tecnología TDM-PON con relación a las WDM-PON es que los requisitos de niveles de potencia son menores y no requieren de un control de gestión de

longitud de onda complejo. Pese a estas ventajas los sistemas TDM-PON tienen algunas limitaciones como el hecho de que la pérdida de potencia aumenta con el número de suscriptores, la privacidad es limitada en el tráfico descendente y el menor ancho de banda. Esta arquitectura como se observa en la Figura 1.2. ha sido adoptada ampliamente por estándares como APON/BPON, EPON, G-PON y XG-PON [9].

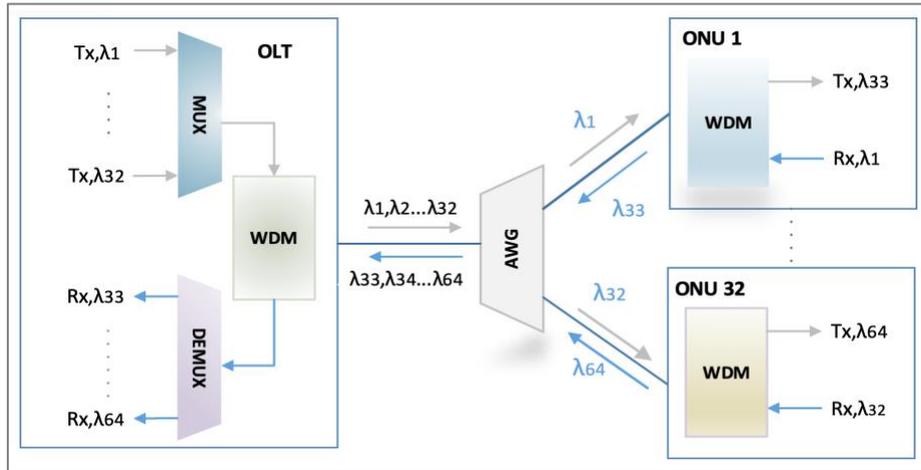


**Figura 1.2.** Arquitectura TDM-PON, red óptica pasiva multiplexada por división de tiempo, basado en **a)** descendente **b)** ascendente [9]

#### 1.4.2.2 MULTIPLEXACIÓN POR DIVISIÓN DE LONGITUD DE ONDA PON (WDM-PON).

Esta tecnología establece una arquitectura lógica punto a punto en una topología física punto a multipunto (consultar Figura 1.3). En la transmisión ascendente, cada ONU utiliza una longitud de onda dedicada para enrutar su tráfico directamente hacia la OLT. En el flujo descendente, por su parte, cada onu recibe su tráfico específico a través de un filtro sintonizable seguido de un fotorreceptor, lo que le permite seleccionar una longitud de onda particular. Alternativamente, se puede emplear un MUX/DEMUX (Arrayed Waveguide Grating, AWG) [9].

Los sistemas WDM-PON ofrecen una serie de ventajas significativas, como una mayor robustez en la seguridad, la capacidad de escalabilidad mejorada, un alcance ampliado y una eficiencia espectral que aprovecha el alto ancho de banda de las redes ópticas. Estas ventajas se logran mediante la simple adición de más longitudes de onda. Sin embargo, es importante destacar que, a pesar de estas características atractivas, la implementación de sistemas WDM-PON también conlleva desafíos, como los costos asociados a los componentes WDM, incluidas las fuentes activas, las ONUs sintonizables, los MUX/DEMUX y los dispositivos AWG, así como mayores costos operativos en comparación con tecnologías tradicionales) [9].

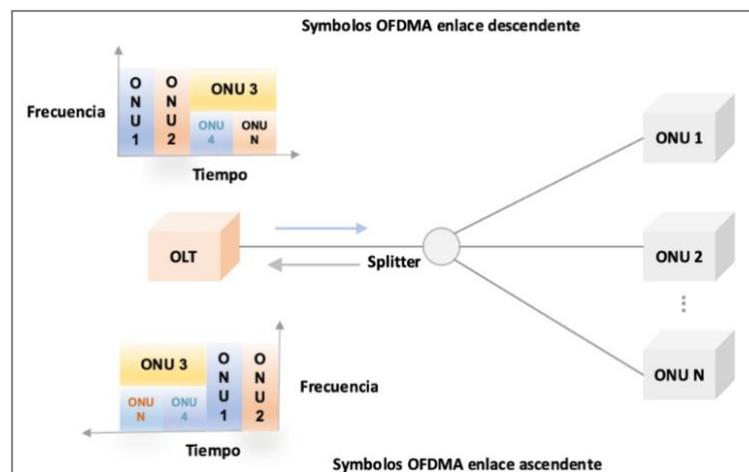


**Figura 1.3.** Arquitectura WDM-PON, red óptica pasiva multiplexada por división de longitud de onda, basado en [9]

### 1.4.2.3 OFDM PON

OFDM es un método de transmisión multiportadora que asigna flujos de bits en serie de alta velocidad a subportadoras con espectros superpuestos, mejorando la eficiencia espectral. Estas subportadoras utilizan esquemas de modulación de alto orden como PSK y QAM, lo que amplía la capacidad del sistema [9].

Se pueden utilizar subportadoras para habilitar OFDMA y permitir una asignación flexible de ancho de banda para múltiples suscriptores y servicios. Se pueden asignar diferentes subportadoras a suscriptores o servicios como TDM, FTTH, FTTB, estación móvil, repetidor WiMAX y puntos de acceso WiFi. Estas características hacen que OFDM sea aplicable a redes de acceso ver Figura 1.4 [9].



**Figura 1.4.** Arquitectura de red óptica pasiva multiplexada mediante OFDM, basada en [9]

#### **1.4.2.4 TECNOLOGÍAS HÍBRIDAS**

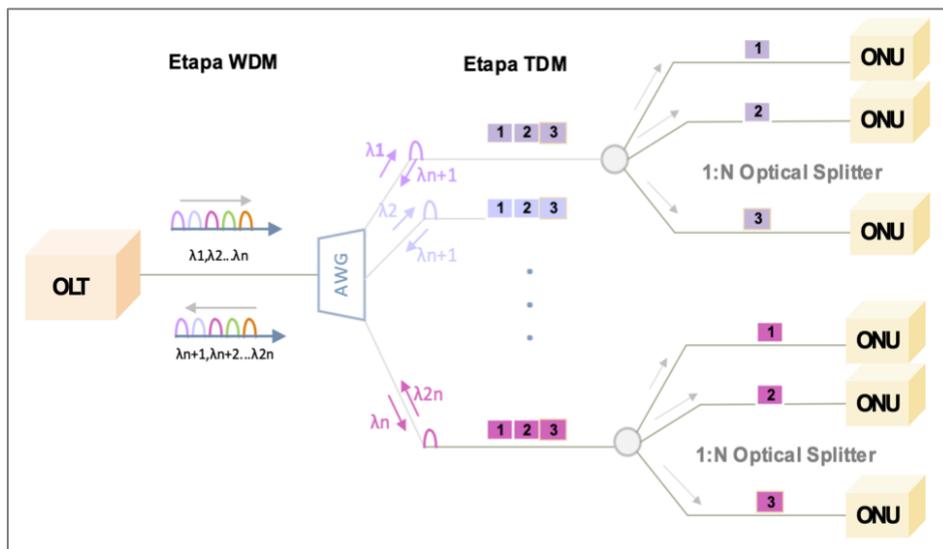
Con el objetivo de contrarrestar las limitaciones de los sistemas PON WDM, se han desarrollado soluciones híbridas que permiten fusionar las mejores características de TDM y WDM. Las PON basadas en TDM limitan a cada suscriptor a un determinado intervalo de tiempo y, por lo tanto, reducen el ancho de banda por suscriptor. En contraste, las PON basadas en WDM pueden resolver los problemas encontrados en las PON TDM mediante la asignación de una longitud de onda a cada suscriptor. Esto proporciona un canal punto a punto separado, seguro y de alta velocidad de datos entre cada suscriptor y el CO (Central Office) [9].

Sin embargo, las soluciones híbridas combinan lo mejor de ambos enfoques. Estas soluciones asignan tanto intervalos de tiempo como longitudes de onda a cada suscriptor, lo que permite una mayor flexibilidad en la asignación de recursos de ancho de banda. De esta manera, se puede aprovechar la capacidad de ancho de banda de las PON WDM y la estructura de tiempo de las PON TDM. Estas soluciones son especialmente beneficiosas en entornos donde se requiere un alto rendimiento y una mayor capacidad de ancho de banda para satisfacer las crecientes demandas de tráfico de datos [9].

##### **1.4.2.4.1 Multiplexación por división de longitud de onda/ multiplexación por división de tiempo PON (WDM/TDM-PON)**

Inicialmente, se introduce un conjunto de longitudes de onda en un tramo de anillo o troncal compartido, que suele ser extenso en la mayoría de los casos. Un demultiplexor WDM se emplea para dispersar los canales de datos hacia múltiples árboles TDM. Para esta tarea, es viable la utilización de un multiplexor/demultiplexor de rejilla de difracción (AWG), cuya representación está presente en la Figura 1.5 [9].

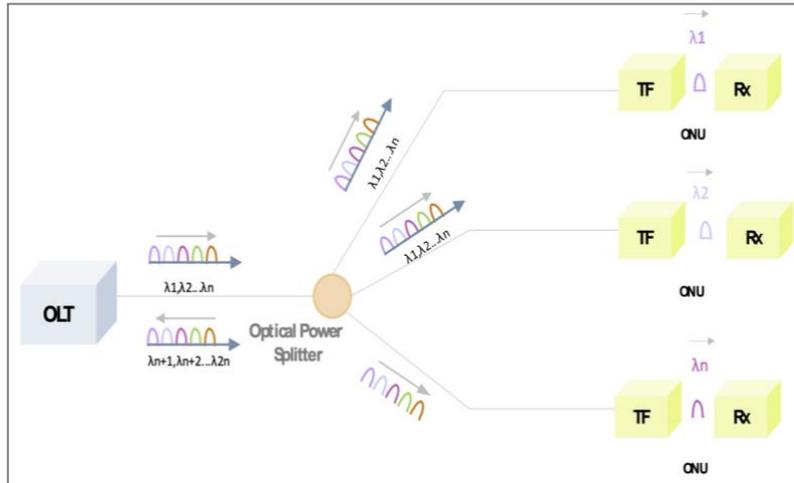
Dichos árboles TDM comprenden cada uno una fibra de alimentación, un divisor de potencia y una fibra de enlace corto. Esta configuración se emplea para compartir una misma longitud de onda entre diversas ONU, lo que posibilita atender a un considerable número de usuarios. Con esta estructura, la inversión en transceptores de longitud de onda fija de bajo costo se concentra en la ONU. Esta táctica se traduce en una mejora del presupuesto de energía, aunque puede conllevar a una disminución de la flexibilidad global de la red PON [9].



**Figura 1.5.** Arquitectura de red óptica pasiva multiplexada por división de longitud de onda (WDM/TDM-PON), basada en [9]

#### 1.4.2.4.2 Multiplexación por división de tiempo y longitud de onda PON (TWDM-PON).

Se emplea TWDM (Time Wavelength Division Multiplexing), donde la totalidad de las longitudes de onda que fluyen a través de la fibra de alimentación WDM son transmitidas a todos los usuarios. Este proceso se efectúa mediante un divisor de potencia, ejemplificado como RN, delegando la tarea de ajustar los intervalos de tiempo a la capa MAC. En esta instancia, la ONU debe ser incolora, lo que significa que es independiente de la longitud de onda, y capaz de ser sintonizada. Esta capacidad se puede alcanzar al utilizar un filtro óptico RX sintonizado a una longitud de onda específica, y se emplean láseres con capacidad de sintonización térmica para llevar a cabo la transmisión en sentido ascendente [9].

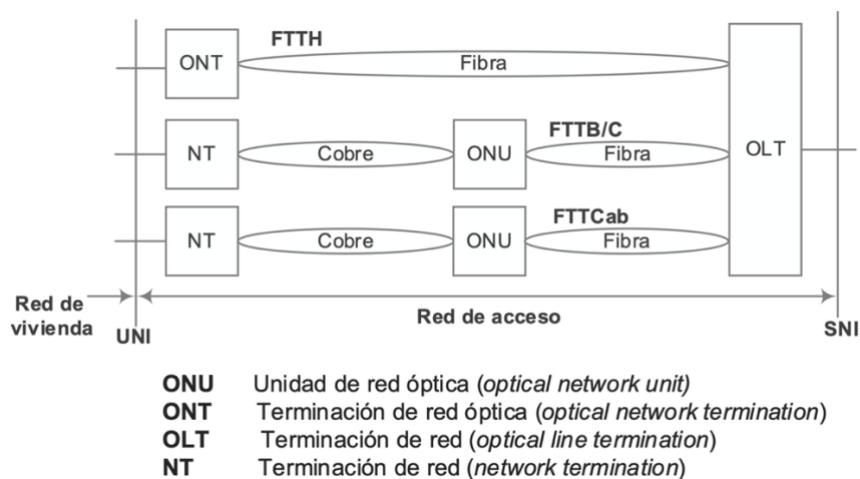


**Figura 1.6.** Arquitectura de multiplexación por división de tiempo y longitud de onda PON (TWDM-PON), basada en [9]

La Figura 1.6 presenta la arquitectura TWDM, la cual ha sido elegida por FSAN para NG-PON2. A lo largo de este documento, se proporcionará una descripción exhaustiva de esta opción y servirá como contexto para examinar el rendimiento y las tolerancias de los subsistemas y dispositivos de la red. Sin embargo, uno de los desafíos principales asociados con la implementación de TWDM son los requisitos de sintonización necesarios para los láseres y filtros en las ONU [9].

### 1.4.3 REDES DE ACCESO FTTX

Los sistemas de red de acceso local pueden tener una arquitectura punto a punto o punto multipunto pasiva o activa, tal como se menciona en la recomendación ITU-T G984.1. En la Figura 1.7 se presentan las arquitecturas FTTx donde x representa el nivel de penetración.



**Figura 1.7.** Arquitectura de una red FTTx [4]

En el escenario FTTH (fiber to the home) la fibra óptica se dirige hasta la vivienda, en el escenario FTT/C (fiber to the building/curb) la fibra llega hasta el edificio/acometida, mientras que FTTCab (fiber to the cabinet) la fibra llega hasta el armario, estas arquitecturas tienen en común la OAN (*red de acceso óptico*).

#### **1.4.3.1 ELEMENTOS DE UNA RED PON**

De manera general una red óptica pasiva consiste en un módulo OLT (Optical Line Terminal) ubicado en el nodo central, uno o varios elementos ópticos pasivos denominados splitters que pueden distribuirse en varias etapas de división. Esta técnica posibilita la compartición de capacidad de la fibra óptica entre múltiples ONUs localizadas en las residencias de los usuarios [4].

##### **1.4.3.1.1 OLT (Optical Line Terminal)**

La OLT es un dispositivo ubicado en una oficina central de la red PON que sirve como punto final del proveedor de servicios. Realiza funciones de gestión de la demanda de tráfico de los suscriptores, así como también funciones de enrutamiento para proveer conectividad hacia redes externas. Adicionalmente se encarga de la conversión eléctrico/óptica y la multiplexación los servicios de datos, voz y video [4].

##### **1.4.3.1.2 ONT (Optical Network Termination)**

La ONT (Optical Network Termination) es un dispositivo de usuario final que se conecta a un extremo de la fibra óptica. Se encarga de la conversión de las señales ópticas a eléctricas para que puedan ser enviadas hacia los usuarios individuales. La ONT agrega y gestiona la información proveniente de cada usuario y la envía hacia la OLT para su procesamiento. La ONT incorpora dos filtros ópticos para separar los servicios de voz, datos y video [4].

##### **1.4.3.1.3 Splitter óptico**

Son elementos pasivos que dividen las señales provenientes del OLT y las entrega a las ONT conectadas. Se encarga de multiplexar las señales recibidas. La división de señal genera pérdidas en la potencia óptica, la atenuación es directamente proporcional al número de salidas [4].

##### **1.4.3.1.4 ODN (Optical Distribution Network)**

Comprende el trayecto que recorre la fibra óptica para interconectar las ONU y las OLT y viceversa. Se encuentra constituida de componentes ópticos pasivos como conectores de fibra óptica, los splitters, cables de fibra óptica y componentes auxiliares que colaboran entre sí. Su diseño, infraestructura y gestión son estratégicos para los operadores, el costo

asociado a la ODN representa alrededor del 60% del costo total del despliegue de una red PON, su alcance es de 20 Km o más [4].

La ODN tiene cinco segmentos que son: la fibra de alimentación comienza desde el marco de distribución óptica (ODF) en la sala de telecomunicaciones de la oficina central (CO) y termina en el punto de distribución óptica para cobertura de larga distancia. La fibra de distribución desde el punto de distribución óptica hasta el punto de acceso óptico distribuye fibras ópticas para las áreas a su lado. La fibra óptica conecta el punto de acceso óptico a los terminales (ONT), logrando la caída de la fibra óptica en los hogares de los usuarios. La ODN es el camino esencial para la transmisión de datos PON y su calidad afecta directamente el rendimiento, la confiabilidad y la escalabilidad del sistema PON [3].

#### 1.4.4 EVOLUCIÓN PONS

Las redes ópticas se han convertido en el medio mayormente adoptado a nivel mundial debido al gran potencial que disponen para proveer conectividad de banda ancha a los usuarios finales. A continuación, se describe el progreso de las redes ópticas pasivas desde sus inicios hasta las propuestas más recientes conforme se puede observar en la línea de tiempo de la Figura 1.8.

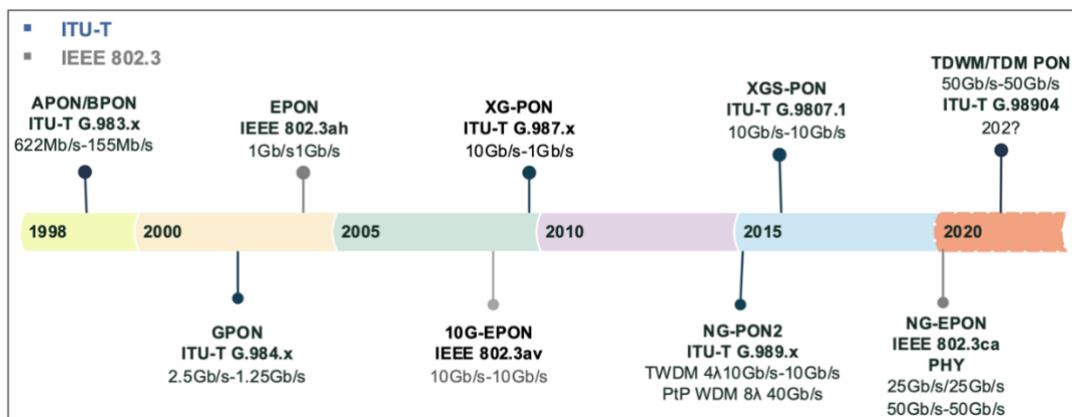


Figura 1.8. Evolución de las Redes de Acceso PON [3]

##### 1.4.4.1 APON (ASYNCHRONOUS TRANSFER PASSIVE OPTICAL NETWORK)

En 1998 se presentó el primer estándar de red óptica pasiva construida con tecnología ATM (Asynchronous Transfer Mode) mediante la recomendación ITU-T G.983.1 al que se denominó APON (Asynchronous Transfer Mode Passive Optical Network) [3]. APON fue la primera red definida oficialmente en el año 1995 por el FSN que surgió como una alternativa para proveer acceso de alta velocidad a través de fibra óptica. Las velocidades

de transmisión en APON pueden ser simétricas con una tasa nominal de 155 Mbps o asimétricas con 155 Mbps para el sentido ascendente y 622 Mbps en sentido descendente [2].

#### **1.4.4.2 BPON (BROADBAND PON)**

Es el segundo estándar aprobado por la ITU-T a través de la recomendación G.983.3 en el 2001 [4]. La llegada de este nuevo estándar introdujo nuevos sistemas WDM. Este estándar originalmente estaba definido para transmitir 155 Mbps simétricos, pero más adelante se modificó para admitir tráfico asimétrico 622 Mbps para tráfico descendente y 155 Mbps para tráfico ascendente y tráfico simétrico de 622 Mbps. No obstante, los altos costes de su implementación y limitaciones técnicas frenaron su expansión [2].

#### **1.4.4.3 GPON (GIGABIT PASSIVE OPTICAL NETWORK)**

Este estándar fue definido y aprobado en el año 2004 mediante la recomendación ITU-T G.984.1, el cual describe sus características. La principal motivación para su desarrollo fue ofrecer mayor ancho de banda y mayor eficiencia en el transporte de servicios IP. GPON es compatible con todos los servicios de telecomunicaciones actuales debido a la introducción de un nuevo método de encapsulación denominado GEM (GPON Encapsulation Method). GPON no es compatible con la tecnología EPON basada en tecnología Ethernet que ha sido ampliamente desplegada en países como Japón [2].

El estándar GPON proporciona velocidades de transmisión de 1244 o 2488 Mbps en la dirección descendente, y 155, 622, 1244 y 2488 Mbps en la dirección ascendente [9]. La combinación más común es una variante asimétrica con 2488 Mbps en sentido descendente y 1244 Mbps en sentido ascendente. Este estándar maneja compatibilidad con estándares anteriores dado que admite velocidades de 155 y 622 Mbs [2].

#### **1.4.4.4 EPON**

EPON es la especificación realizada por el grupo de trabajo Ethernet en la última milla EFM (Ethernet in the First Mile) constituido por la IEEE. Los EPON también se denominan Gigabit Ethernet PON o GEPON, descrito en el estándar 802.3ah-2004. Las velocidades de transmisión son simétricas, la capacidad que soporta EPON es de 1.25 Gbps [2].

#### **1.4.4.5 NG-PON1**

Los requerimientos de la próxima generación se enfocaron en abordar la conexión de una mayor cantidad de usuarios, mejorar la calidad de servicio (QoS) y reforzar la seguridad

[2]. Para el desarrollo del NG-PON1, se evaluaron diversas opciones potenciales: TDM-PON, WDM-PON, OFDM-PON y combinaciones de estas tecnologías. Sin embargo, la problemática residía en las diferencias arquitectónicas y en los perfiles de servicio entre estas diversas soluciones [2].

Tras un análisis exhaustivo, el sistema XG-PON se estableció como la elección más adecuada para el NG-PON1 [2]. De manera general, el XG-PON se subdivide en dos variantes: XG-PON1 y XG-PON2, siendo la diferencia principal las tasas de transferencia proporcionadas por cada tecnología [2]. El XG-PON1 admite una velocidad de transferencia de 10 Gbps en la dirección descendente y 2,5 Gbps en la dirección ascendente, mientras que el XG-PON2 es un sistema simétrico que ofrece un ancho de banda de 10 Gbps en ambas direcciones. Para el XG-PON2, también se introduce el concepto de PON simétrico de próxima generación (XGS-PON), resaltando su inherente naturaleza simétrica [2]. La razón detrás de esta distinción radica principalmente en consideraciones económicas, ya que la variante simétrica tiende a ser más costosa [2].

#### **1.4.4.6 NG-PON2**

Este estándar es una propuesta, definida en la serie de recomendaciones G.989 en el año 2015. El requerimiento fundamental de la PON de próxima generación es ofrecer parámetros de transmisión superiores a los estándares PON existentes, en el contexto de necesidades crecientes de ancho de banda. El sistema NG-PON2 tiene la capacidad de respaldar velocidades de 40 Gbps en la dirección descendente y 10 Gbps en la dirección ascendente. En términos de cobertura, se estipula que NG-PON2 alcance los 40 km utilizando infraestructura pasiva, mientras que la distancia total se establece en 60 km [2]. La visión para NG-PON2 es que sea una infraestructura multipropósito, capaz de integrar diversos servicios de telecomunicaciones y satisfacer las demandas de nuevos servicios digitales [1].

## 2. METODOLOGÍA

El desarrollo de redes ópticas pasivas de nueva generación se dividió en dos generaciones, NG-PON1 y NG-PON2. En un inicio la primera generación NGPON1 consideró su despliegue sobre infraestructura heredada mientras que NG-PON2 se ideó para desplegarse sobre una infraestructura de red nueva. Sin embargo, se consideraron parámetros adicionales como los costes de inversión de la ODN existente y el desarrollo de ambas tecnologías se enfocó en mantener una operación conjunta con estándares PON más antiguos en una infraestructura de red común [5].

El presente capítulo tiene por objetivo realizar un análisis técnico de las tecnologías de nueva generación, a fin de establecer las características de cada estándar con respecto a su arquitectura, niveles de potencia, asignación de ancho de longitud de onda, velocidades de transmisión, capa de convergencia, mecanismos de operación y mantenimiento. Estos aspectos permitirán definir los requisitos que se deben cumplir para integrar tecnología de nueva generación a un sistema PON existente.

Los requerimientos generales de las redes ópticas pasivas con capacidad de 10 Gigabit se definen en la serie de recomendaciones ITU-T G.987.x con el objetivo de promover la compatibilidad con versiones anteriores con el ODN existente que cumple con los sistemas GPON [6].

El desarrollo de la tecnología NG-PON1 se centró en ofrecer una mejor calidad de servicio QoS, incrementar la conexión de usuarios y reforzar la seguridad [2]. Para cumplir este objetivo se propuso como el mejor candidato un sistema denominado XG-PON [2]. XG-PON se divide en XG-PON1 y XG-PON2 cuya diferencia radica en las tasas de transferencia otorgadas [2].

La tasa de transferencia para el sistema XG-PON1 denominado XG-PON se establece en 2.5 Gbps en dirección ascendente mientras que para la dirección descendente se establece en 10 Gbps, XG-PON2 es un sistema simétrico denominado XGS-PON que ofrece 10 Gbps en ambas direcciones de transmisión. El motivo de esta división es principalmente económico dado que, debido a su naturaleza simétrica, el sistema XGS-PON más costoso [6].

## 2.1 TECNOLOGÍA XGS-PON

La tecnología XGS-PON es un estándar de nueva generación definido bajo la serie de recomendaciones ITU-T G.9807.x: 10-Gigabit-Capable Symmetric Passive Optical Network (XGS-PON) [7]. XGS ofrece una velocidad de línea nominal de 10 Gbps en cada longitud de onda de trabajo. Es decir, esta solución se plantea para trabajar con 10 Gbps simétricos.

### 2.1.1 ARQUITECTURA DE LA RED DE ACCESO ÓPTICO

El esquema que plantea el G.9807.1 para la arquitectura de un sistema PON con XGS-PON no es más que el planteado para las tecnologías anteriores que se recogen en los estándares G.987 [22] y G.984 [2], como se observa en la Figura 2.1.

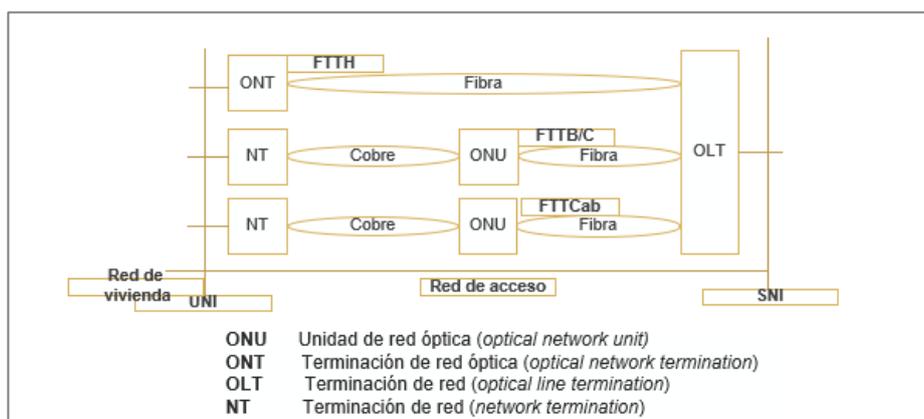


Figura 2.1. Arquitectura de red para XGS-PON [7]

### 2.1.2 CONFIGURACIÓN DE REFERENCIA

En la Figura 2.2 se muestra una configuración de referencia simple y de alto nivel de XGS-PON, que muestra una configuración de referencia de alto nivel muy similar a la de ITU-T G.983.x, ITU-T G.984.x y ITU - serie de recomendaciones T G.987.x [7].

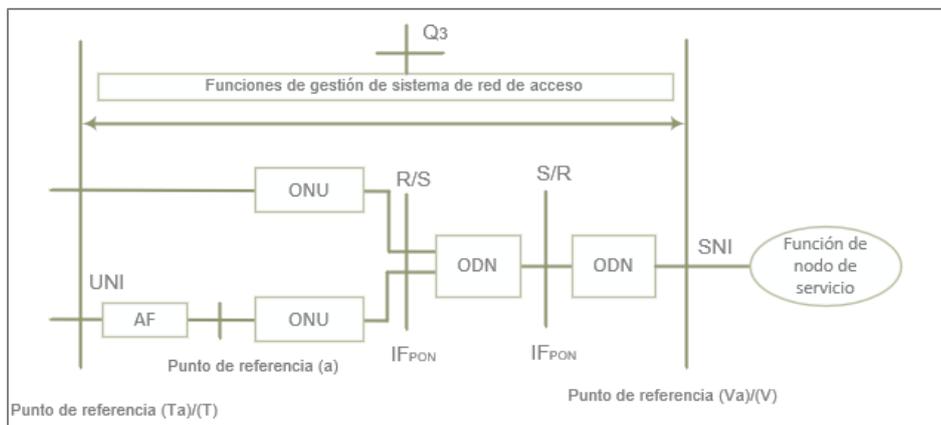


Figura 2.2. Configuración de referencia de alto nivel de XGS-PON [7]

Además de la Figura 2.2, cuando XGS-PON se implementa con un servicio de superposición de video de radiofrecuencia (RF), la ODN puede usar un dispositivo de multiplexación por división de onda (WDM) o un acoplador/divisor óptico para combinar XGS-PON y señales de vídeo [7].

### 2.1.3 TASAS DE TRANSMISIÓN

XGS-PON provee las siguientes tasas de transmisión en función del escenario que se desee implementar.

- **XGS-PON:** Tasa nominal de 10 Gbps simétricos, 10 Gbps de downstream y 10 Gbps de upstream.

Si se considera la convivencia de TDMA con las ONU XG-PON heredadas, la OLT también admitirá:

- **XG-PON:** Nominalmente 10 Gbps de downstream, 2.5 Gbps de upstream.

### 2.1.4 NIVELES DE POTENCIA ÓPTICA

XGS-PON debe estar en capacidad de operar en ODN de pérdida nominal de 28/29 dB, según el plan de conjunto de longitud de onda utilizado. El conjunto de longitud de onda básico se alinea con la clase N1 de XG-PON para 29 dB, considerando la pérdida adicional en el WDM1r<sup>1</sup> para esta banda. El conjunto de longitudes de onda opcionales se alinea con la clase B+ de G-PON para 28 dB, considerando la menor pérdida en el WDM1r para esta banda. Además de estos presupuestos de pérdida, también se prevén los presupuestos de potencia N2 (31 dB), E1 (33 dB) y E2 (35 dB) de XG-PON y el presupuesto de potencia C+ (32 dB) de G-PON [7]. Cuando se adopta la reutilización de la longitud de onda G-PON, dado que se reutilizará el puerto G-PON del WDM1r, se deben considerar las clases de presupuesto de energía heredadas B+ o C+. Las especificaciones detalladas para las clases nominales y la clase extendida se muestran en el Anexo B.

**Tabla 2.1.** Balances ópticos para enlace XGS-PON [7]

	GPON Clase B+	GPON Clase C+	Clase Nominal 1 N1	Clase Nominal 2 N2	Clase Extendida 1 E1	Clase Extendida 2 E2
<b>Pérdida Min</b>	13 dB	17 dB	14 dB	16 dB	18 dB	20 dB
<b>Pérdida Max</b>	28 dB	32 dB	29 dB	31 dB	33 dB	35 dB

<sup>1</sup> WDM1: Filtro WDM que suele ubicarse en la oficina central para combinar/aislar las longitudes de onda de las señales XG-PON y G-PON, en ocasiones puede combinar señales de video [7].

### 2.1.5 PLAN DE LONGITUDES DE ONDA

Los sistemas XGS-PON vienen con dos opciones de longitud de onda operativa:

- **Conjunto básico de longitudes de onda:** Consiste en la reutilización de longitudes de onda XG-PON, en cuyo caso el sistema tiene que adaptarse tanto a las ONU XGS-PON como a las ONU XG-PON heredadas, a través de un esquema TDMA nativo de velocidad ascendente dual y un esquema TDM descendente [7].
- **Conjunto de longitudes de onda opcionales:** Consiste en la reutilización de longitudes de onda G-PON, para los operadores que no tienen Gigabit PON heredado en el área de implementación. Esto permite que XGS-PON coexista con XG-PON heredado a través de la superposición de longitudes de onda [7].

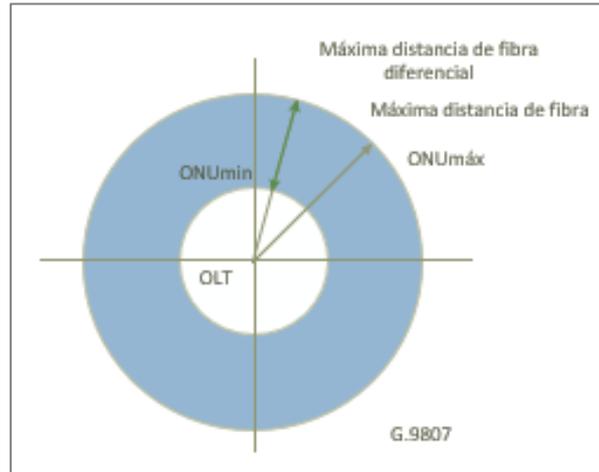
Los casos en los que el conjunto básico de longitudes de onda XGS-PON coexiste con el conjunto opcional de longitudes de onda XGS-PON son perfectamente válidos.

**Tabla 2.2.** Asignación de longitud de onda XGS-PON, basado en [7].

	Conjunto de longitudes de onda opcional básico [nm]		Conjunto de longitudes de onda opcional [nm]	
<b>Upstream</b>	1 260	1 280	1 300	1 320
<b>Downstream</b>	1 575	1 580 1 581(Exteriores)	1 480	1 500

### 2.1.6 PARÁMETROS DE DISTANCIA

A continuación, se abordan los parámetros de extensión lineal de XGS-PON mediante el innovador concepto de "distancia de fibra". Cada ONU se caracteriza por su propia distancia de fibra. En situaciones en las que hay pares de ONU en la misma interfaz de la Red Óptica Pasiva (PON) de la Terminal de Línea Óptica (OLT), la "distancia de fibra diferencial" se refiere a la diferencia entre las distancias de fibra individuales de estos pares de ONU. Los conceptos relacionados con la "distancia de fibra" se presentan de manera visual en la Figura 2.3 para una mejor comprensión [7].



**Figura 2.3.** Distancia máxima entre la ONU y OLT [7]

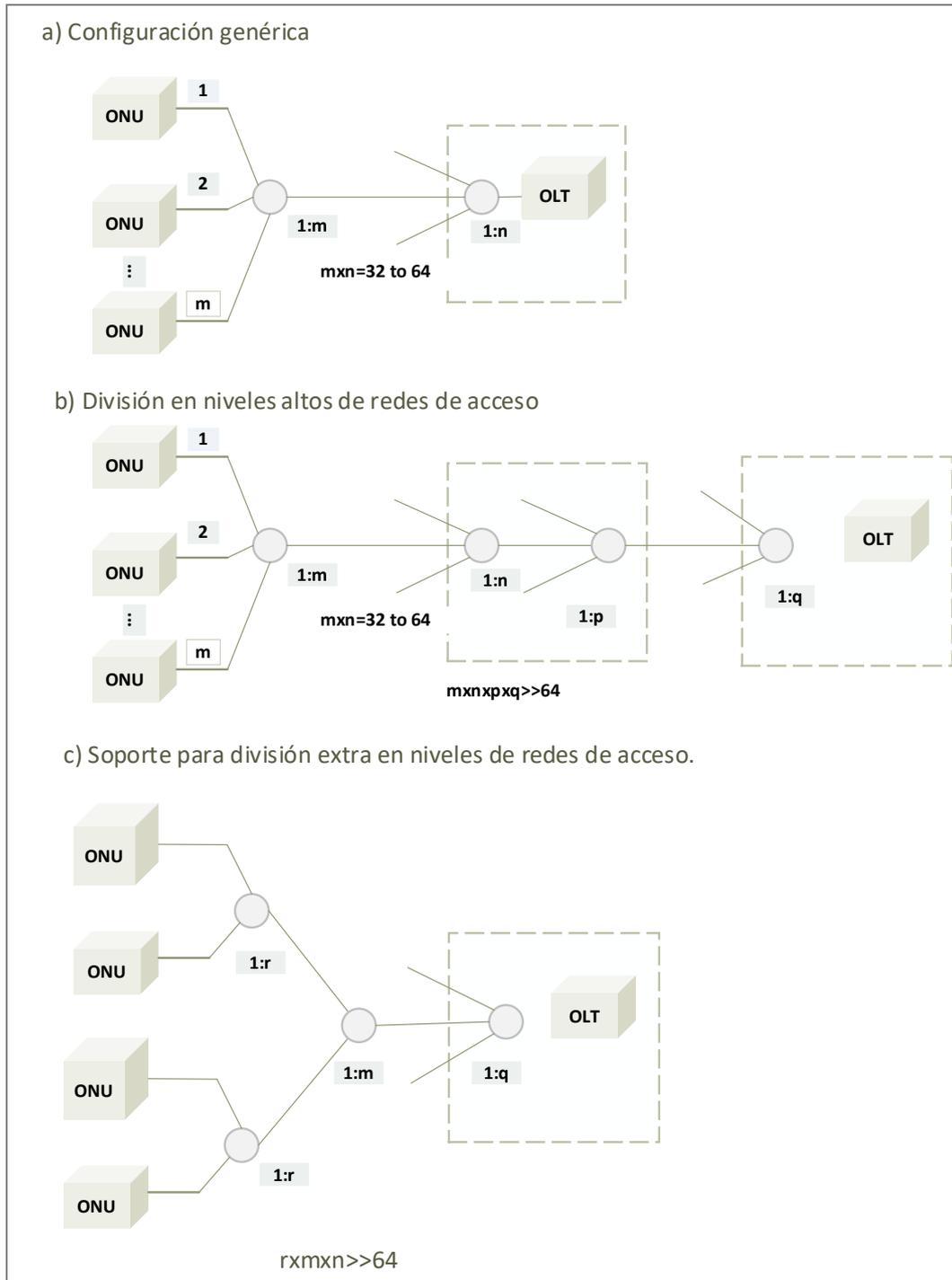
Donde la distancia máxima entre la OLT y una ONU puede ser 20 km o 40 km, y la distancia máxima diferencial entre ONUs será de 20 km debido a la sincronización, ya que, a más de 20 km de diferencia, el diferente delay de las ONUs haría imposible la correcta sincronización de todas. Las OLTs permiten por configuración sincronizar ONUs a distancias entre 20 y 40 km.

### 2.1.7 RELACIÓN DE DIVISIÓN

Dado que muchos operadores de redes han estructurado su ODN con divisiones que oscilan entre 1:32 y 1:64 para las redes Gigabit PON, se establece que la división 1:64 (sujeta a las limitaciones presupuestarias de pérdida) será el requisito mínimo para permitir la coexistencia requerida por XGS-PON [7].

En este contexto, la arquitectura de división única representa un caso especial en el que  $m = 64$  y  $n = 1$ , y no se requiere la inclusión de un divisor en el nodo de acceso. Algunos operadores de redes han manifestado su interés en ampliar la división más allá de 1:64 (por ejemplo, en el rango de 1:128 a 1:256) para mejorar la economía global de XGS-PON en comparación con G-PON [7].

La posibilidad de una división más alta permite extender la Red Óptica Pasiva (PON) en la sección de enlace de retorno, como se muestra en (b), y/o expandir la red PON hacia los usuarios finales, como se ilustra en (c). Esto posibilita configuraciones de división más flexibles y una eficiente adaptación a diversas situaciones de implementación. Con estas opciones en mente, la función de control TDMA de XGS-PON debería admitir una división lógica de al menos 256 vías [7].



**Figura 2.4.** Distancia máxima entre la ONU y OLT [7]

### 2.1.8 ESTRUCTURA EN CAPAS DE LA RED ÓPTICA XGS-PON

El modelo de referencia del protocolo se estructura en tres componentes principales: el medio físico, la convergencia de transmisión (TC) y las capas de trayecto. Un ejemplo de cómo se aplica este modelo al contexto de XGS-PON se presenta en la Tabla 1.3.

En una infraestructura de red XGS-PON, la capa de trayecto se equipará con la capa de encapsulación X-GEM. La capa XGS-PON TC, por su parte, se desglosa en subcapas de transmisión y adaptación de PON. Estas subcapas reflejan la subdivisión de convergencia de transmisión en el X-GEM, que a su vez es responsable de transportar diversos tipos de datos.

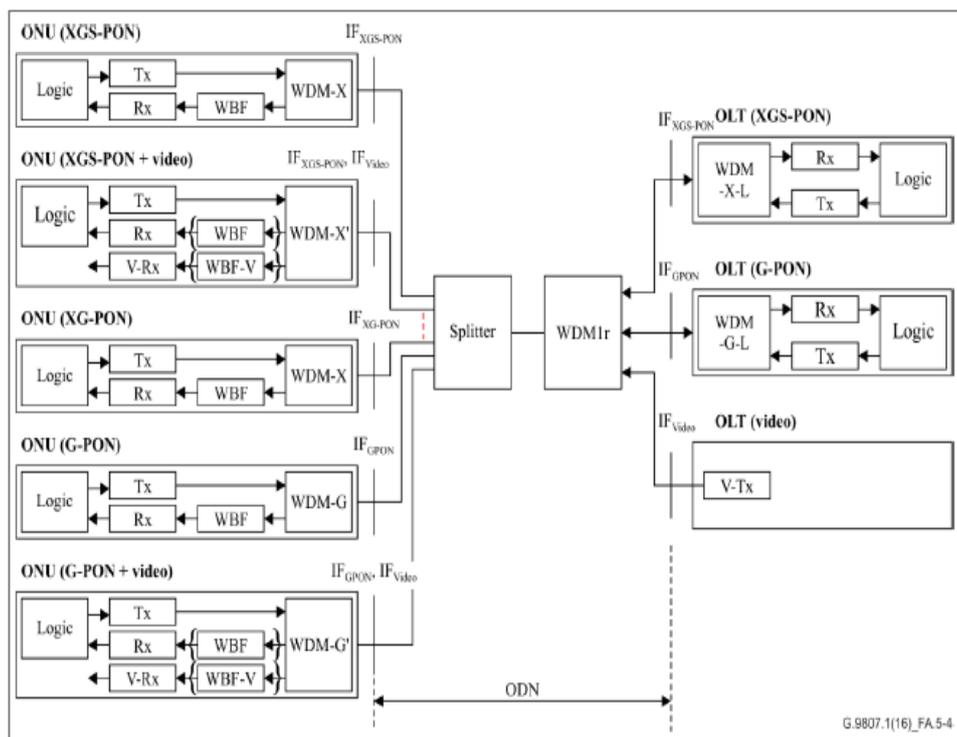
**Tabla 2.3.** Estructura en capas de la red XGS-PON [7]

Capa de ruta			
Capa media de transmisión	Capa XGS-PON TC	Adaptación	Encapsulación X-GEM
		PON transmission	Asignación de ancho de banda del puerto X-GEM Manejo de QoS y gestión de T-CONT Privacidad y seguridad Alineación de fotogramas Rango Sincronización de ráfagas Sincronización bit/byte
Capa media física		Adaptación E/O Multiplexación por División de Longitud de Onda Conexión de fibra	
NOTA – La capa del medio de transmisión debe proporcionar las funciones OAM conexas.			

La subcapa de transmisión PON asume la función de transmisión necesaria en el ODN. Las funciones específicas de la red PON se concluyen en esta subcapa de transmisión PON y no son visibles desde la subcapa de adaptación. En este contexto, las dos capas fundamentales consideradas son la capa dependiente del medio físico (PMD) y la capa de convergencia de transmisión (TC). Cada una de estas capas desempeña un papel crucial en la estructura y funcionamiento de la red XGS-PON [7].

### 2.1.9 ESCENARIOS DE COEXISTENCIA DE XGS-PON CON GENERACIONES HEREDADAS

En el contexto de XGS-PON, se presentan diversas arquitecturas de Red Óptica Distribuida (ODN) que permiten la coexistencia con tecnologías anteriores y la habilitación de servicios adicionales, como la distribución de video RF. La Figura 2.4 ilustra la arquitectura de referencia para esta coexistencia, abarcando XGS-PON, XG-PON, G-PON y el servicio de video RF [7].



**Figura 2.5.** Arquitectura de referencia para la coexistencia de XGS-PON, G-PON, XG-PON y servicio de video RF [7]

Algunos de los bloques que se observan en la Figura 2.3, tienen las siguientes funciones:

**Tx, Rx:** Transmisor y receptor respectivamente.

**V-Tx, V-Rx:** Transmisor y receptor de video respectivamente

**WBF:** Filtro de bloqueo de longitud de onda para bloquear las señales de interferencia hacia Rx.

**WBF-V:** Filtro de bloqueo de longitud de onda para bloquear las señales de interferencia en V-Rx.

**WDM-X:** Filtro WDM en la ONU XG-PON que combina/aísla longitudes de onda de subida y de bajada de XG-PON.

**WDM-X':** Filtro WDM en la ONU XG-PON que combina/aísla longitudes de onda de subida y de bajada de XGS-PON y separa señales de video.

**WDM-G:** Filtro WDM en la ONU G-PON que combina/aísla longitudes de onda de subida y bajada de G-PON.

**WDM-G':** Filtro WDM en la ONU G-PON que combina/aísla longitudes de onda de subida y de bajada de G-PON y separa señales de video.

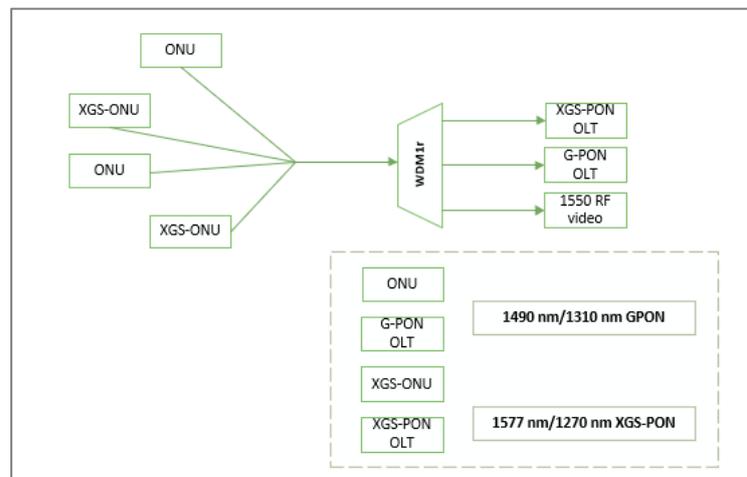
**WDM-X-L:** Filtro WDM en la OLT XG-PON que combina/aísla longitudes de onda de subida y de bajada de XG-PON.

**WDM-G-L:** Filtro WDM en la OLT G-PON que combina/aísla longitudes de onda de subida y de bajada de G-PON.

Dentro del marco de la arquitectura presentada en la Figura 2.4, se identifican cuatro escenarios distintos de coexistencia, los cuales se describen a continuación:

### 2.1.10 ESCENARIO DE COEXISTENCIA DE G-PON, XGS-PON Y VIDEO RF

En esta configuración, se alcanza este escenario mediante la incorporación de un componente WDM1r. Este elemento, que podría ubicarse en la oficina central, posee la capacidad de fusionar o separar diferentes longitudes de onda de las señales de XGS-PON y G-PON, además de facilitar la combinación de señales de video RF. En la configuración representada en la Figura 2.5, se emplea el conjunto estándar de longitudes de onda XGS-PON. En esta configuración específica, G-PON utiliza sus bandas de longitud de onda de operación, al igual que XGS-PON hace uso de sus propias bandas de longitud de onda de operación [7].

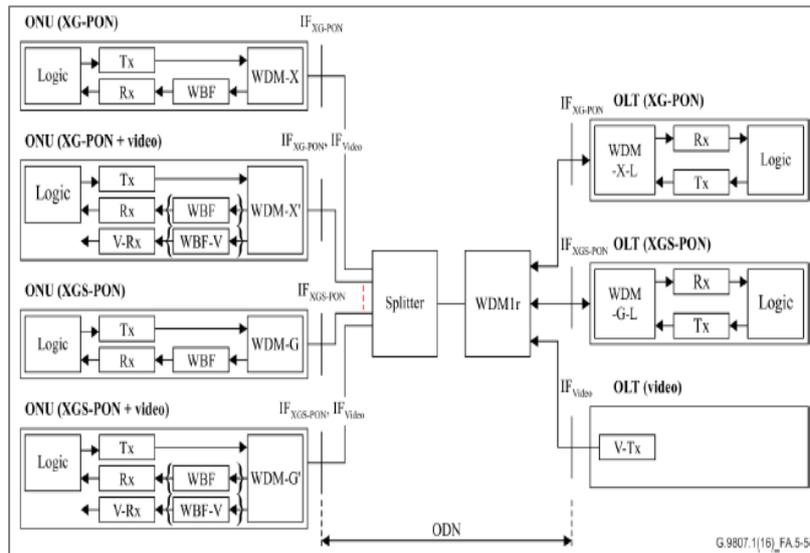


**Figura 2.6.** Bandas de longitud de onda de operación utilizadas en el escenario de coexistencia de G-PON, XGS-PON y servicio de video RF [10]

#### 2.1.10.1 ESCENARIO DE COEXISTENCIA DE XGS-PON, XG-PON - VIDEO RF

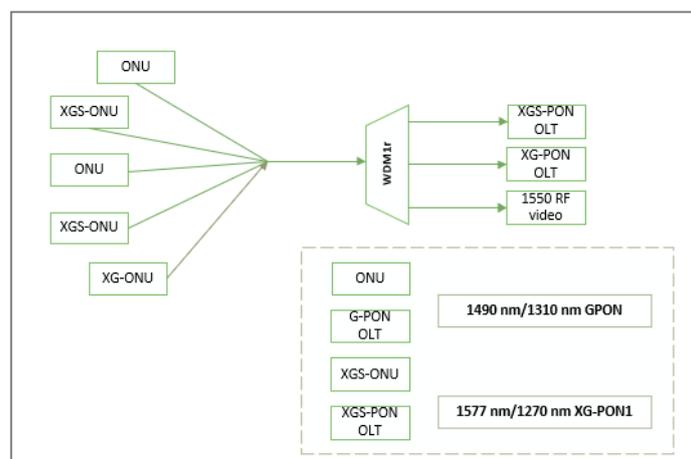
Similar al escenario previo, la coexistencia de XGS-PON, XG-PON y video RF también implica la utilización de un componente WDM1r. Sin embargo, en este caso específico, se recurre al empleo del conjunto opcional de longitudes de onda de XGS-PON. En la Figura 2.7, se presenta de manera visual la arquitectura de referencia diseñada para facilitar la

coexistencia de estas tres tecnologías: XGS-PON, XG-PON y la distribución de video RF [7].



**Figura 2.7.** Arquitectura de referencia para la coexistencia de XGS-PON, XG-PON y video RF [10]

Tal como se observa en el escenario anterior, la coexistencia de XGS-PON, XG-PON y video RF también se logra mediante la incorporación de un componente WDM1r. No obstante, en esta instancia particular, se opta por utilizar el conjunto de longitudes de onda opcionales de XGS-PON. La Figura 2.8 proporciona una representación visual de la arquitectura de referencia desarrollada con el propósito de facilitar la coexistencia de estas tres tecnologías: XGS-PON, XG-PON y la distribución de señales de video RF.

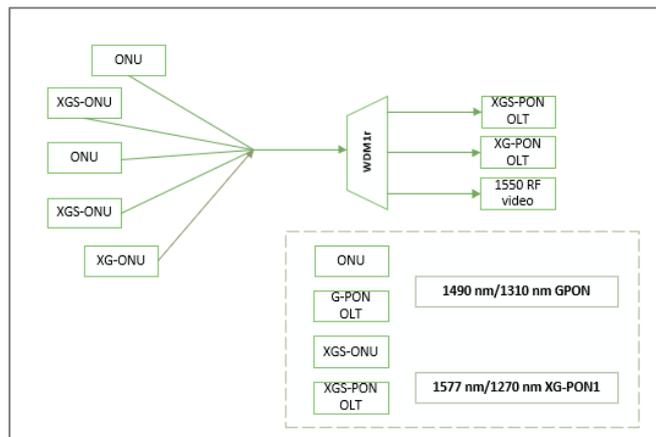


**Figura 2.8.** Bandas de longitud de onda operación utilizadas en el escenario de coexistencia de XG-PON, XGS-PON y video RF [10]

### 2.1.10.2 ESCENARIO DE COEXISTENCIA DE XG-PON Y XGS-PON

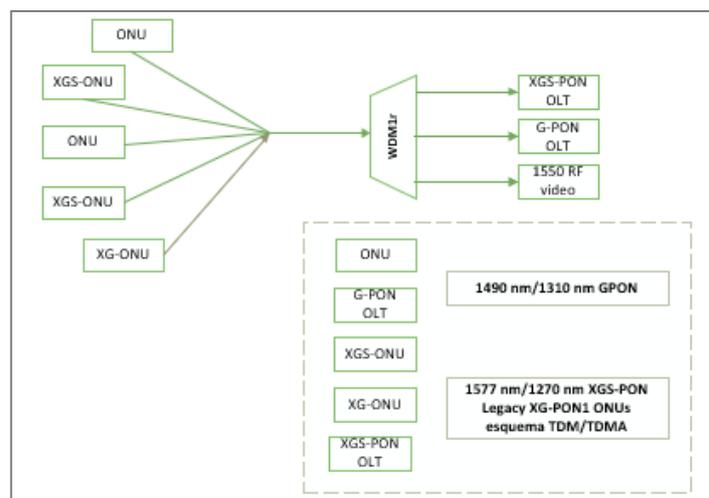
En este escenario particular de coexistencia, se prescinde del uso del componente WDM1r y en su lugar se implementa el conjunto básico de longitudes de onda. Para permitir la coexistencia de XGS-PON y XG-PON en este contexto, se emplea un esquema de acceso denominado TDM/TDMA (Time Division Multiplexing/Time Division Multiple Access).

La Figura 2.9 proporciona una representación visual de este escenario, donde se ilustra cómo las dos tecnologías coexisten en un mismo puerto de la OLT de XGS-PON y cómo se maneja el flujo de datos en ambas direcciones.



**Figura 2.9.** Escenario de coexistencia de XGS-PON con XG-PON utilizando el conjunto básico de longitudes de onda basado en [10]

### 2.1.10.3 ESCENARIO DE COEXISTENCIA DE XGS-PON, XG-PON, GPON Y VIDEO RF



**Figura 2.10.** Distribución de las bandas de longitud de onda de operación para coexistencia de XGS-PON, XG-PON, G-PON y video RF [10]

Este escenario se implementa mediante la incorporación del componente WDM1r, el cual tiene la función de combinar o aislar las señales de XGS-PON, G-PON y video RF. En este contexto, se emplea el conjunto estándar de longitudes de onda, y la coexistencia de XGS-PON con XG-PON se logra siguiendo lo previamente descrito en el escenario anterior. La Figura 2.10 presenta una representación visual que muestra la distribución de las bandas de longitud de onda de operación para las distintas tecnologías involucradas [7].

#### **2.1.10.4 ESCENARIOS DE MIGRACIÓN DE XGS-PON**

El sistema XGS-PON está diseñado para salvaguardar las inversiones hechas en las redes PON preexistentes y, al mismo tiempo, garantizar una migración sin complicaciones y transparente para los usuarios de estas redes hacia la infraestructura XGS-PON. Para abordar esta transición, se establecen dos escenarios de migración: el escenario de migración Brownfield y el escenario de migración Greenfield [7].

##### **2.1.10.4.1 Escenario Brownfield**

El escenario PON Brownfield se refiere a la situación en la que ya existe un sistema PON en funcionamiento, y los operadores toman la decisión de utilizar la infraestructura de fibra existente para brindar servicios de mayor ancho de banda mediante la tecnología XGS-PON. En este escenario, algunos de los suscriptores que forman parte del sistema G-PON o XG-PON existente pueden requerir una actualización a un servicio de mayor velocidad. Los operadores pueden elegir migrar a estos suscriptores al sistema XGS-PON, mientras que otros permanecerán en las redes G-PON o XG-PON [7].

Los requisitos generales para este escenario incluyen:

**Coexistencia de G-PON y XGS-PON:** Si los recursos de fibra no son necesariamente abundantes, es recomendable que las tecnologías G-PON y XGS-PON coexistan en la misma infraestructura de fibra. Esto permite una transición fluida y aprovecha al máximo los recursos disponibles [7].

**Minimización de Interrupciones:** Durante el proceso de migración, es fundamental reducir al máximo las interrupciones de servicio para los suscriptores que no se están actualizando. Esto asegura una experiencia de usuario ininterrumpida y positiva [7].

**Compatibilidad de Servicios:** XGS-PON debe tener la capacidad de admitir y emular todos los servicios previamente ofrecidos por las tecnologías G-PON y XG-PON. Esto es esencial para lograr una migración completa y exitosa, sin comprometer la calidad de los servicios previos [7].

En resumen, el escenario PON Brownfield se trata de una migración gradual y cuidadosamente gestionada de una infraestructura de red existente hacia la tecnología XGS-PON, permitiendo a los operadores brindar servicios de mayor velocidad y capacidad sin dejar de atender a los suscriptores actuales que no se están actualizando

#### **2.1.10.4.2 Escenario Greenfield**

La renovación de la red de acceso y la transición a infraestructuras basadas en FTTx representan una de las mayores inversiones para los proveedores de servicios. Este proceso puede ser largo y requerir recursos significativos. A medida que la tecnología XGS-PON alcance un nivel de madurez, es probable que los proveedores de servicios consideren su implementación como una forma de actualizar o reemplazar las infraestructuras existentes basadas en cobre, así como para expandirse a nuevas áreas de desarrollo con el objetivo de ofrecer mayores velocidades de conexión y/o una mayor capacidad de usuarios.

El término "campo verde PON" se utiliza para describir áreas donde la tecnología Gigabit PON (G-PON) aún no ha sido implementada. En este escenario, los proveedores de servicios podrían aprovechar la oportunidad de utilizar la tecnología XGS-PON. La adopción de XGS-PON en "campo verde PON" puede proporcionar beneficios económicos al mismo tiempo que permite ofrecer un mayor ancho de banda por usuario en comparación con G-PON [7].

En los escenarios de "campo verde PON", la coexistencia con tecnologías previas como XG-PON no es un requisito, lo que otorga flexibilidad a los proveedores de servicios al decidir qué tecnología implementar. Esto puede ser especialmente útil en áreas donde la implementación de XG-PON no está prevista y, por lo tanto, no se necesita coexistir con ella.

En resumen, la adopción de XGS-PON en renovaciones de red y en áreas nuevas de desarrollo ofrece a los proveedores de servicios la posibilidad de mejorar la oferta de ancho de banda, expandir su alcance y lograr una mayor eficiencia económica. La elección entre tecnologías como XGS-PON y G-PON dependerá de las necesidades específicas de cada proveedor y de las características de implementación de cada área [7].

#### **2.1.11 BENEFICIOS DE XGS-PON**

La tecnología XGS-PON ofrece una serie de beneficios significativos que la hacen atractiva para la implementación en redes de acceso de fibra óptica. A continuación, se presentan algunos de los principales beneficios de XGS-PON:

**Mayor Rendimiento:** En comparación con tecnologías anteriores como el cobre de par trenzado, los cables coaxiales y las generaciones previas de PON, XGS-PON proporciona un rendimiento notablemente mejor. Puede ofrecer velocidades de hasta 10 Gbps tanto en el enlace de bajada como en el de subida, lo que permite a los proveedores de servicios brindar conexiones de alta velocidad a sus usuarios [7].

**Alcance Mejorado:** XGS-PON tiene un mayor alcance en comparación con tecnologías PON anteriores. Mientras que las tecnologías anteriores tenían un alcance máximo de 20 km, XGS-PON puede alcanzar distancias de hasta 40 km sin extensores y hasta 60 km con extensores, lo que es beneficioso para abarcar áreas más amplias [7].

**Mayor Capacidad de Usuarios:** XGS-PON tiene una mayor capacidad para albergar un mayor número de usuarios en la misma infraestructura. Con una relación de división máxima de 1:256, supera la capacidad de redes G-PON que típicamente tienen una relación máxima de división de 1:128. Esto permite a los proveedores de servicios atender a una mayor cantidad de usuarios sin comprometer el rendimiento [7].

**Mejora de la Productividad Empresarial:** La tecnología XGS-PON beneficia a las empresas al mejorar la comunicación interna y externa. Facilita el intercambio de datos en tiempo real y proporciona un acceso más rápido y confiable a servicios en la nube. Esto conduce a una mayor eficiencia y ahorro de tiempo para las operaciones comerciales [7].

**Preparada para el Futuro:** XGS-PON está diseñada para ser una solución de acceso a largo plazo. Puede coexistir con tecnologías PON anteriores, lo que facilita una transición gradual y evita la necesidad de una actualización completa de la infraestructura. Esto brinda a los proveedores de servicios flexibilidad para adaptarse a las demandas cambiantes del mercado [7].

**Apoyo a Diferentes Escenarios de Migración:** XGS-PON ofrece dos escenarios de migración, Brownfield y Greenfield, que permiten a los operadores adaptarse a diferentes condiciones de implementación y necesidades de los usuarios, ya sea actualizando redes PON heredadas o implementando nuevas redes desde cero [7].

En conjunto, estos beneficios hacen de XGS-PON una opción atractiva para proveedores de servicios que buscan brindar servicios de alta velocidad y capacidad en redes de acceso de fibra óptica, al tiempo que garantizan un rendimiento confiable y una transición suave para los usuarios [7].

## **2.2 DESCRIPCIÓN GENERAL DE NG-PON2**

El estándar de próxima generación NG-PON 2 con capacidad de 40 Gbps (NG-PON2) ha sido recientemente estandarizado por el Sector de Normalización de Telecomunicaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones. La estandarización de NG-PON2 se basa en tres estándares clave: UIT-T Rec. G.989.1, UIT-T G.989.2, y UIT-T G.989.3 [11].

La recomendación UIT-T G.989.1 establece los requisitos generales para sistemas de redes ópticas pasivas con capacidad de 40 Gbps (NG-PON2) y define su arquitectura. Por su parte, UIT-T G.989.2 se centra en la capa dependiente del medio físico (PMD), y el Rec. UIT-T G.989.3 especifica la capa de convergencia de transmisión (TC) específica para NG-PON2. En esta sección se proporciona un resumen conciso de la recomendación UIT-T G.989.1, mientras que las dos siguientes secciones detallan las recomendaciones ITU-T G.989.2 (incluyendo los componentes de hardware involucrados) y ITU-T G.989.3, respectivamente.

Estos estándares combinados forman la base para la implementación y funcionamiento de NG-PON2, proporcionando directrices y especificaciones clave para asegurar la interoperabilidad y el desempeño adecuado de esta tecnología de red de próxima generación [11].

### **2.2.1 ARQUITECTURA DE LA RED DE ACCESO ÓPTICO**

La arquitectura de un sistema NG-PON2 coincidiría principalmente con la de los estándares GPON y XG-PON, es decir, adopta una arquitectura pasiva con configuración Ptm al igual que sus antecesores, aunque NG-PON2 incorpora nuevas prestaciones mejoradas que se detallarán en apartados posteriores.

### **2.2.2 CONFIGURACIÓN DE REFERENCIA**

De la figura 2.11 se deduce que en un sistema PON de longitud de onda múltiple, como es el caso de NG-PON2, la OLT está compuesta conceptualmente por múltiples terminaciones de canal (CT - Channel Termination) conectadas a través de un multiplexor de longitud de onda (WM - Wavelength Multiplexer). El punto de referencia S/R-CG denota la localización donde la OLT envía (para las ONUs) y recibe (desde las ONUs) un conjunto de pares de longitud de onda pertenecientes a los sentidos ascendentes y descendentes de la comunicación, denominados CG (Channel Group) [11].

La infraestructura asociada a la ODN abarca desde la salida del WM (punto de referencia S/R-CG), hasta la entrada de la ONU (punto de referencia R/S). De la misma forma que en XGS-PON, la ODN en NG-PON2 puede consistir en un único segmento de distribución

óptico pasivo (ODS - Optical Distribution Segment), o bien podría estar formada por un grupo de ODSs pasivos interconectados mediante extensores de alcance (RE - reach extenders)[11].

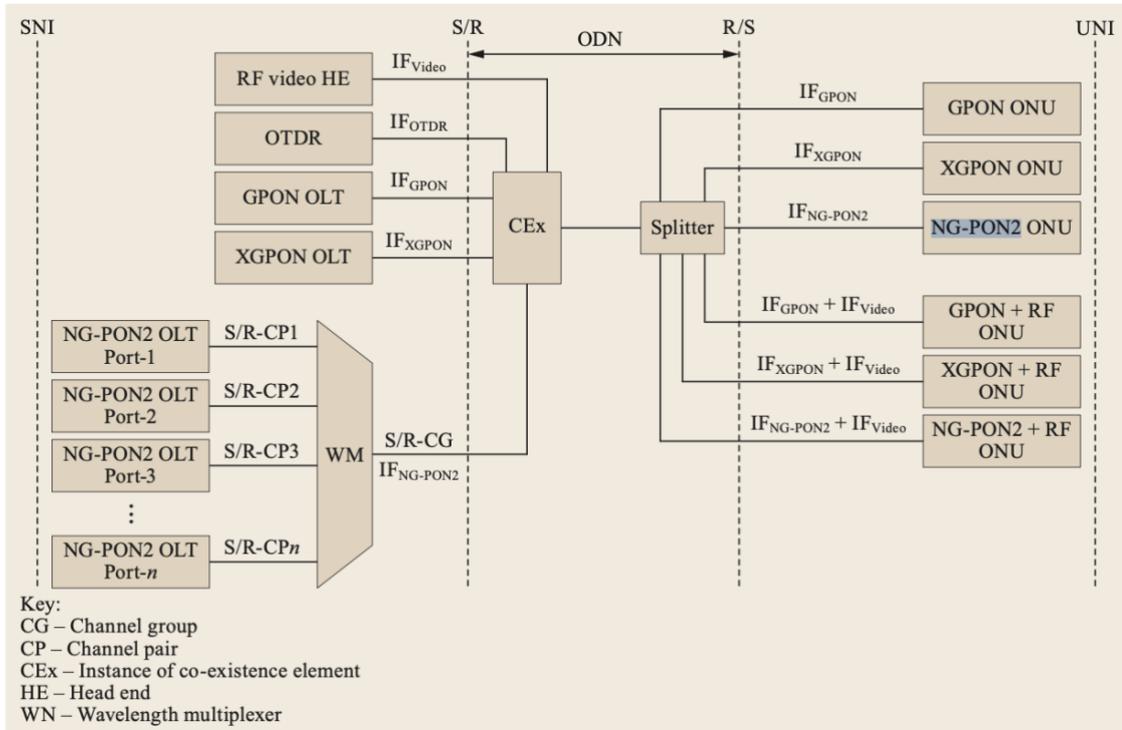


Figura 2.11. Arquitectura NG-PON2 [12]

### 2.2.3 TASAS DE TRANSMISIÓN

NG-PON2 presenta tres opciones distintas de velocidad de transmisión por cada canal de acceso TWDM, según se muestra en la Tabla 2.9.

Tabla 2.4. Tasas de transmisión para NG-PON2 [11]

	UPSTREAM	DOWNSTREAM
<b>SISTEMA 1</b>	2.5 Gbps	2.5 Gbps
<b>SISTEMA 2</b>	2.5 Gbps	10 Gbps
<b>SISTEMA 3</b>	10 Gbps	10 Gbps

### 2.2.4 NIVELES DE POTENCIA ÓPTICA

En la Tabla 3.11 se muestran los parámetros de potencia de transmisión y sensibilidad referidos al SISTEMA 3 NG-PON2 por ser la opción de mayor futuro, formado por canales TWDM con una velocidad de transmisión de 10 Gb/s simétricos. Los parámetros son especificados tanto para las ONUs como las OLTs, respecto de las distintas clases ODN definidas para NG-PON2, y de los tipos de enlace posibles.

**Tabla 2.5.** Niveles de potencia óptica para NG-PON2 [30]

Elemento	Unidades	Valor Nominal			
<b>OLT</b>					
		N1	N2	E1	E2
<b>Potencia media de transmisión (MIN)</b>	dBm	+3	+5	+7	+9
<b>Potencia media de transmisión (MAN)</b>	dBm	+7	+9	+11	+11
<b>Enlace Tipo A</b>	dBm	-26.5	-28.5	-31	N/A
<b>Enlace Tipo B</b>	dBm	-28.5	-30.5	-33	-33
<b>ONU</b>					
<b>Clase ODN</b>		N1	N2	E1	E2
<b>Enlace Tipo A</b>	dBm	+4	+4	+4	N/A
<b>Enlace Tipo B</b>	dBm	+2	+2	+2	+4
<b>Sensibilidad min</b>		-28	-28	-28	-28
<b>Enlace Tipo A</b>	dBm	+9	+9	+9	NA
<b>Enlace Tipo B</b>	dBm	+7	+7	+7	+9

Los parámetros de potencia de la interfaz óptica de transmisión y recepción para los canales TWDM y PtP WDM en NG-PON2, están especificados con el propósito de que admitan las cuatro clases OPL definidas en XG-PON. Por ello, las clases OPL especificadas en XG-PON1 se mantienen para NG-PON2 sin presentar restricciones en cuanto al número y distribución geográfica de los divisores ópticos de potencia a emplear, dentro de los límites de alcance. Esto permitirá la reutilización de la infraestructura de fibra XG-PON previamente instalada.

Además, las clases OPL XG-PON/NG-PON2 N1 (14-29 dB) y E1 (18-33 dB) son compatibles respectivamente con las clases OPL GPON B+ (13-28 dB) y C+ (17-32 dB). Esto permite la coexistencia de sistemas NG-PON2, XG-PON y GPON en el mismo ODN, tal y como se verá en detalle en apartados posteriores [31]. Como una opción de implementación, NG-PON2 incluye dos tipos de enlaces TWDM ascendentes, que difieren en sus parámetros de interfaz óptica. Los parámetros del enlace Tipo A se basan en la suposición implícita de no utilizar preamplificadores ópticos en el receptor OLT. Por el contrario, los parámetros del enlace Tipo B están ligados a un receptor OLT ópticamente preamplificador.

Por consiguiente, el enlace Tipo A requiere de un transmisor ONU más potente. Por su parte, el enlace Tipo B requiere una sensibilidad más fina del receptor OLT en el punto S/R-CG, para poder interpretar señales recibidas de baja intensidad afín de amplificarlas posteriormente [29].

## 2.2.5 PLAN DE LONGITUDES DE ONDA

La Tabla 2.11 presentas las especificaciones del plan de longitudes para los canales TWDM y PtP WDM en NG-PON2. La compartición del espectro planteada permite la coexistencia completa entre NG-PON2 y el resto de los sistemas legados (GPON, XG-PON, sistemas de radio frecuencia, sistemas de video, etc.) [29].

**Tabla 2.6.** Plan de longitudes de onda para NG-PON2 [30]

	Elemento	Unidades	Valor Nominal
TWDM PON	<b>ASCENDENTE</b>		
	OPCION BANDA ANCHA		
	Límite inferior	nm	1524
	Límite superior	nm	1544
	OPCION BANDA REDUCIDA		
	Límite inferior	nm	1528
	Límite superior	nm	1540
	OPCION BANDA ESTRECHA		
	Límite inferior	nm	1532
	Límite superior	nm	1540
	<b>DESCENDENTE</b>		
	Límite inferior	nm	1596
	Límite superior	nm	1603
PtP	ESPECTRO EXPANDIDO		
WD	Límite inferior	nm	1524
	Límite superior	nm	1525
M	ESPECTRO COMPARTIDO		
	Límite inferior	nm	1603
	Límite superior	nm	1625

La selección del plan de longitud de onda en NG-PON2 fue el resultado de una evaluación exhaustiva de muchas opciones, y un compromiso entre dos requisitos aparentemente divergentes. Si bien debe permitir la coexistencia con generaciones PON heredadas, también debe ser lo suficientemente flexible para adaptarse a diferentes escenarios de implementación y expansión futura [31]. Para ello, la opción de espectro expandido PtP WDM PON admite una gran flexibilidad, hasta tal punto que podría ser empleada tanto para

habilitar la coexistencia con sistemas PON legados, como para admitir nuevos escenarios de implementación [31].

El sistema NG-PON2 debe garantizar la posibilidad de flexibilidad espectral para permitir actualizaciones en su capacidad de forma progresiva, en función del crecimiento de la demanda de servicios. La flexibilidad espectral también debe facilitar una gama de escenarios de coexistencia que evite la interferencia con sistemas heredados, para posteriormente pasar a liberar estas bandas de frecuencia una vez que caigan en desuso por la desactivación de los sistemas legados [30]. Para cumplir con los requisitos anteriores, el sistema NG-PON2 debe ofrecer la posibilidad de acceder a múltiples longitudes de onda, grupos de longitudes de onda, o bandas de longitud de onda, que puedan separarse física y lógicamente. De esta forma, podrán ser gestionadas de manera aislada, ya sea a través de un única OLT, o por múltiples OLTs independientes [30].

El espectro TWDM descendente, fue diseñado específicamente para evitar interferencias con señales de video RF y XG-PON1. Las tres opciones espectrales TWDM ascendente (banda ancha, banda reducida y banda estrecha) están determinadas por las capacidades de gestión de longitud de onda del transmisor ONU, con un mejor control que permite el uso de una banda operativa más estrecha [31].

Para los canales PtP WDM ascendente y descendente, se proporcionan dos modalidades espectrales. La primera opción de espectro expandido es adecuada para implementaciones green field, o reutilizaciones flexibles de partes del espectro asignadas a priori a otros sistemas PON que se encuentren en desuso. La segunda opción de espectro compartido se emplea en despliegues brown field de coexistencia total con los sistemas PON heredados. A diferencia de TWDM, PtP WDM permite que los canales ascendente y descendente se encuentren en la misma banda de longitud de onda, y así permitir una mayor flexibilidad de implementación [31].

## **2.2.6 PARÁMETROS DE DISTANCIA**

Los sistemas NG-PON2 deben soportar un alcance de fibra de al menos 40 km, y 60 km o más si fuera necesario mediante el uso de extensores de alcance [30].

Los sistemas NG-PON2 también necesitan soportar una distancia máxima de fibra diferencial de hasta 40 km, parámetro configurable entre las opciones 20 y 40 km, coincidiendo con lo definido en el estándar XG-PON [30].

### **2.2.7 RELACIÓN DE DIVISIÓN**

Las redes ópticas actuales que explotan divisores de potencia se implementan normalmente con una relación de división que va desde 1:16 hasta 1:128. Los sistemas NG-PON2 deben poder ejecutar ODNs de división de potencia heredadas tal y como se ha mencionado anteriormente, lo cual implica convivencia entre estos elementos y nuevos mecanismos de enrutamiento de longitud de onda. Por ello, los sistemas NG-PON2, deben ser lo suficientemente flexibles como para permitir implementaciones rentables en una gran variedad de ODNs con tipologías distintas [30].

La OLT NG-PON2 debe admitir una relación de división de al menos 1:256 para poder igualar al parámetro en XG-PON, es decir, 256 ONUs bidireccionales por ODN. Sin embargo, algunas aplicaciones específicas y diversas opciones de ingeniería de red podrían requerir mayores proporciones de división. Por ello, el diseño del núcleo OLT NG-PON2 no debería impedir el soporte de mayores relaciones de división [30].

Al igual que en el resto de los sistemas PON, un número elevado de ONUs por ODN permite un alto grado de compartición de la infraestructura, y una buena consolidación de los nodos de red si se acompaña con un gran alcance. Sin embargo, el sistema podría verse obligado a sacrificar la ganancia compartida, por su creciente complejidad y por las limitaciones del balance de potencia. En algunos escenarios de implementación, la relación de división física podría ser aumentada mediante extensores de alcance con un balance de pérdida mejorado [30].

### **2.2.8 TECNOLOGÍA NG-PON2**

El estándar está basado en dos tecnologías novedosas introducidas por primera vez en escenarios PON, TWDM (Time and Wavelength Division Multiplexing) y PtP WDM (Point to Point Wavelength Division Multiplexing) [31]. De manera común en ambos tipos de canales, cada OLT/ONU opera a una longitud de onda concreta, lo cual supone una importante diferencia conceptual respecto de GPON/XG-PON, en las que todos los elementos activos funcionaban a la misma longitud de onda. En TWDM-PON, las ONUs tienen asignado también un slot temporal, con lo que se consigue un acceso múltiple no sólo por división de longitud de onda, sino también por división de tiempo.

Así, cada ONU tiene asignado un slot temporal, y unas longitudes de onda de bajada y subida, que son compartidas a su vez por otras ONUs pertenecientes al mismo subgrupo del total de ONUs existentes en la ODN. Por otro lado, PtP WDM está pensado para soportar servicios dedicados en los que se necesita una comunicación sostenida y de alta capacidad. A diferencia de la configuración TWDM, en la que las longitudes de onda de

subida y baja son compartidas por conjuntos de ONUs. Esto hace que PtP WDM en NG-PON2, sea único en comparación con los conceptos de sistemas anteriores que acuden a mecanismos TDM de una forma u otra, ya que este establece canales WDM únicos y dedicados por conexión sin emplear ningún tipo de multiplexación en el tiempo. A nivel tecnológico, ambos canales plantean una arquitectura de sistema de transmisión casi idéntica, donde los transceptores sintonizables operarán en un rango de longitudes de onda muy parecido.

Por ello, los mismos dispositivos optoelectrónicos podrán ser empleados en ambos tipos de canales, resultando en una sinergia en la tecnología de transceptores sintonizables que habilitará una producción masiva, dando lugar a un menor costo por componente óptico. La Figura 2.13 muestra un esquema representativo de TWDM-PON.

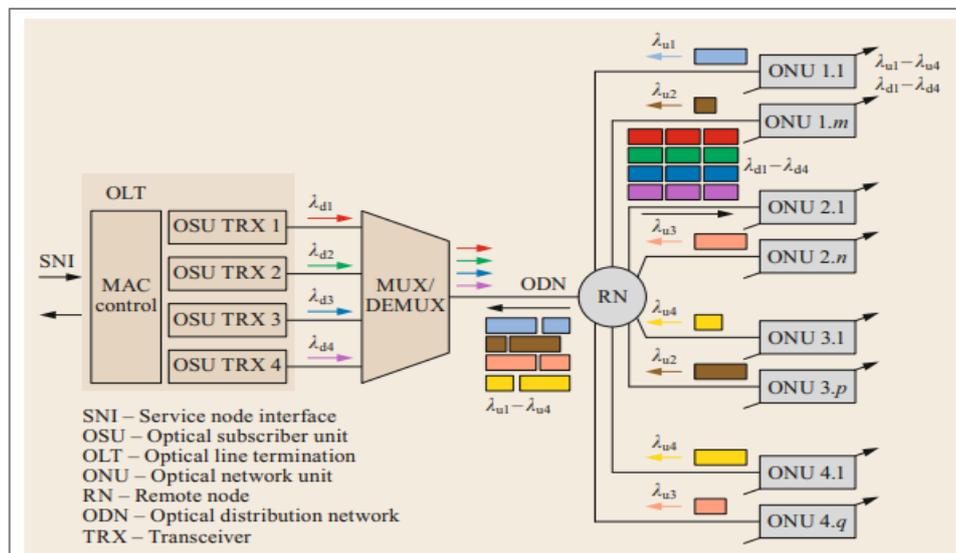


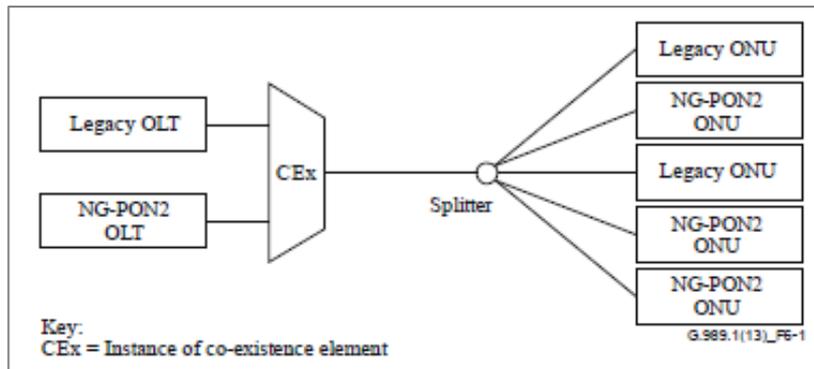
Figura 2.12. TWDM en NG-PON2 [30]

## 2.2.9 ESCENARIOS DE COEXISTENCIA DE NG-PON2 CON GENERACIONES ANTERIORES

La coexistencia facilita una transición fluida entre las generaciones PON previas y NG-PON2, lo que simplifica la migración y la implementación de nuevas conexiones PON según sea necesario, sin causar interrupciones en el servicio. Para lograr la máxima flexibilidad, el sistema NG-PON2 debe tener la capacidad de coexistir con G-PON y XG-PON1 en la misma Red Óptica Distribuida (ODN).

Para lograr esta coexistencia, es fundamental que el sistema NG-PON2 pueda aprovechar los divisores de potencia óptica PON ya existentes, además de operar en las partes no utilizadas del espectro donde están desplegadas las PON heredadas en una instalación

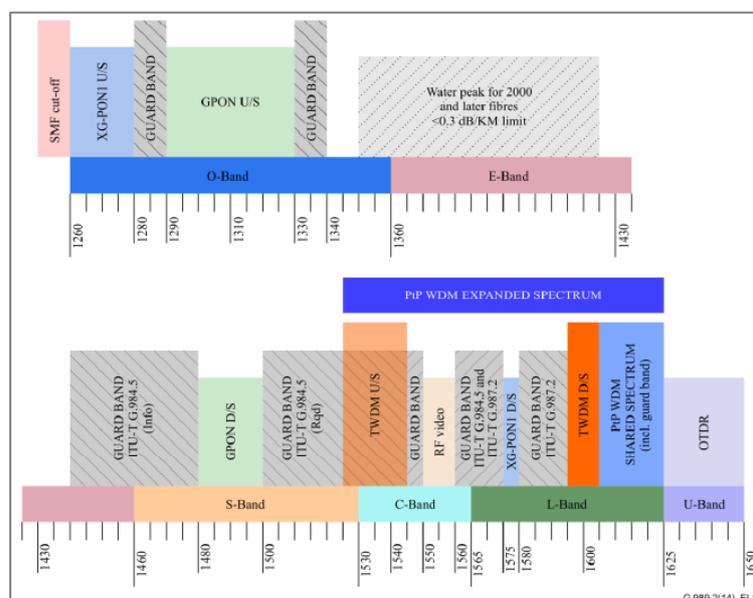
específica. En el caso de que no haya coexistencia con una PON heredada, el sistema NG-PON2 puede reutilizar el espectro asignado originalmente a dicha PON heredada. Es esencial que el sistema NG-PON2 garantice esta coexistencia en toda la extensión de la ODN, desde el extremo del proveedor hasta el extremo del usuario final, abarcando incluso la coexistencia en la fibra principal, como se muestra en la Figura 2.14.



**Figura 2.13.** Escenario de coexistencia de la ODN [16].

El sistema NG-PON2 utiliza el elemento CEx para lograr la coexistencia con los sistemas heredados PON. El elemento CEx es un dispositivo multiplexor/demultiplexor de qué tipo? que permite combinar o aislar longitudes de onda de señales NG-PON2, PON heredadas y de video RF.

En la Figura 2.12 se puede observar un ejemplo de escenario de coexistencia entre NG-PON2, G-PON y video RF.



**Figura 2.14.** Plan de longitudes de onda de NG-PON2, coexistencia con tecnologías heredadas [17]

### 2.2.10 ESCENARIOS DE MIGRACIÓN DE NG-PON2

Los posibles escenarios de migración para NG-PON2, al igual que en XGS-PON, incluyen tanto Brownfield como Greenfield. Es fundamental que el sistema NGPON2 facilite una transición tecnológica sin ocasionar interrupciones prolongadas en el servicio. Los clientes individuales deben tener la capacidad de actualizar según su demanda, respaldando tanto la ruta de migración de G-PON a NG-PON2 como la ruta de migración de XG-PON1 a NG-PON2.

En la implementación de la ruta de migración, se presentan tres opciones que varían en su nivel de flexibilidad:

**Migración Directa:** Esta opción implica una transición directa desde G-PON a NG-PON2 a través de XG-PON. Requiere una migración completa de G-PON a XG-PON antes de la actualización a NG-PON2. Para lograr esto, se elimina G-PON de la ODN y se reutiliza la ventana de longitud de onda de PON. Esto posibilita que la tecnología NG-PON2 coexista con XG-PON.

**Migración Flexible:** La migración flexible comprende una ruta de migración directa de G-PON a NG-PON2, con el requerimiento de que el sistema NG-PON2 sea capaz de coexistir con G-PON.

**Migración Integral:** El nivel más alto de flexibilidad se alcanza con el sistema NG-PON2, que permite la coexistencia de G-PON, XG-PON y NG-PON2. La opción de migración integral es más compleja, ya que implica el uso de diversas longitudes de onda ópticas. La capacidad de NG-PON2 para coexistir con sistemas G-PON y XG-PON proporciona mayor flexibilidad para actualizar a XG-PON a corto plazo y migrar a NG-PON2 en el futuro. Esto también permite una migración directa de G-PON a NG-PON2. Esta opción se prefiere, ya que preserva la viabilidad de la ODN heredada y brinda a los operadores un alto grado de flexibilidad.

### 2.2.11 BENEFICIOS DE NG-PON2

La tecnología NG-PON2 brinda algunos beneficios, entre los cuales se puede destacar:

**Coexistencia y ahorro de costos:** Actualizar las tecnologías PON heredadas a NG-PON2 es posible, ya que ambas utilizan la misma infraestructura principal. Esto significa que todos los cables, armarios, divisores, fibras y otros activos físicos siguen siendo los mismos. Por lo tanto, reutilizar la infraestructura ODN de la tecnología PON heredada reduce los costos.

**Velocidades de conexión mejoradas:** Inicialmente, NG-PON2 proporcionará una capacidad agregada de 40 Gbps en el enlace de bajada y una capacidad agregada de 10

Gbps para el enlace de subida. Además, tiene una meta de 160 Gbps para el enlace de bajada y 80 Gbps para el enlace de subida. Estas velocidades son sumamente superiores a tecnologías PON anteriores como G-PON que poseen velocidades máximas de hasta 2.5 Gbps

**Capacidad simétrica y aumento de productividad:** NG-PON2 tiene la capacidad de ofrecer velocidades de línea simétricas de hasta 10 Gbps. Estas velocidades de línea simétrica son requeridas principalmente por usuarios empresariales para una mejor comunicación con sus clientes (transferencia de datos en tiempo real), por lo tanto, NG-PON2 también aumenta la productividad de las empresas.

**Mayor alcance:** NG-PON2 tiene un mayor alcance que tecnologías PON anteriores. Mientras que el alcance máximo para las tecnologías PON anteriores es de 20 km, NG-PON2 tiene un alcance de 40 km sin extensores y un alcance de 60 km con extensores.

**Mayor capacidad de usuarios:** NG-PON2 tiene la capacidad de albergar más usuarios que tecnologías PON anteriores ya que tiene una relación mínima de división de 1:256 con capacidad de ampliarse mucho más. Si comparamos esta relación de división con G-PON, observamos que es sumamente superior ya que G-PON posee una relación de división máxima de 1:128.

**Alta escalabilidad:** NG-PON2, al utilizar la tecnología TWDM, por lo que brinda una mayor escalabilidad es decir la capacidad de añadir más usuarios a su red.

**Pago según el crecimiento:** NG-PON2, permite a los usuarios de todo tipo actualizar y ampliar su capacidad cuando estos tengan los recursos y así lo requieran. Es importante escalar gradualmente según el tamaño o las necesidades del usuario. Esta es una excelente opción para que las pequeñas empresas actualicen el servicio TWDM-PON a medida que crecen, adaptándose a las necesidades de cada usuario individual. Además, permite a los operadores expandir su negocio a medida que las pequeñas empresas crecen y actualizan sus conexiones.

# 3. RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo se procede a realizar el análisis técnico comparativo entre XGS-PON y NG-PON2 en términos de arquitectura, funcionamiento, velocidades de transmisión, características de la fibra óptica, alcance, longitud de onda de operación, relación de máxima división de los splitters, servicios soportados, requisitos de sistema, niveles de potencia, clases de ODN y escenarios de migración y coexistencia.

## 3.1 ANÁLISIS

### 3.1.1 ANÁLISIS TÉCNICO COMPARATIVO ENTRES LAS REDES DE ACCESO XGS-PON Y NG-PON2

A continuación, se establece un análisis técnico comparativo entre las redes de acceso XGS-PON y NG-PON2 en función a varios aspectos clave:

#### **Velocidades y Capacidad:**

**XGS-PON:** Con una velocidad de 10 Gbps simétrica, XGS-PON es capaz de ofrecer una experiencia de usuario excepcional en términos de transmisión de datos, video en alta definición, juegos en línea y aplicaciones empresariales. Esta velocidad es suficiente para la mayoría de las necesidades actuales, aunque podría resultar insuficiente en el futuro a medida que aumenten las demandas de ancho de banda.

**NG-PON2:** Inicialmente ofrece la misma velocidad que XGS-PON, pero su principal ventaja radica en su capacidad para aumentar su velocidad a 40 Gbps. Esto es especialmente importante para aplicaciones y servicios emergentes, como la realidad virtual, la realidad aumentada y la transmisión de video en ultra alta definición. NG-PON2 es una opción más escalable y preparada para el futuro en términos de capacidad.

#### **Capacidad de División:**

**XGS-PON:** La capacidad de división 1:32 significa que un único puerto PON puede conectar hasta 32 usuarios. Esto es adecuado para áreas con una densidad de usuarios moderada.

**NG-PON2:** Con una capacidad de división de 1:64 o incluso mayor, NG-PON2 es más adecuado para zonas con una densidad de usuarios más alta. Esto es crucial para áreas urbanas densamente pobladas y para la expansión futura de la red.

### **Multiplexación:**

**XGS-PON:** Utiliza la multiplexación por división de tiempo (TDM) para compartir el ancho de banda entre los usuarios. Aunque eficaz, puede haber limitaciones en la asignación de ancho de banda según las demandas cambiantes.

**NG-PON2:** Su enfoque en la multiplexación por longitud de onda (WDM) permite una mayor flexibilidad en la asignación de ancho de banda. Cada suscriptor tiene acceso a una longitud de onda dedicada, lo que facilita la adaptación a diferentes necesidades.

### **Flexibilidad y Futuro:**

**XGS-PON:** Ofrece una solución robusta para las necesidades actuales y es más fácil de implementar y gestionar en comparación con NG-PON2. Sin embargo, su falta de flexibilidad en la asignación de ancho de banda podría limitar su capacidad para adaptarse a futuras aplicaciones y demandas.

**NG-PON2:** Su enfoque en WDM y la posibilidad de aumentar la velocidad lo hacen más adaptable a las futuras demandas de ancho de banda. Además, NG-PON2 es una plataforma sólida para la innovación y nuevas aplicaciones.

### **Costos y Complejidad:**

**XGS-PON:** Por lo general, se considera más asequible y fácil de implementar que NG-PON2 debido a su enfoque menos complejo en la asignación de recursos.

**NG-PON2:** Dado su enfoque en WDM y sus mayores capacidades, podría requerir una inversión inicial más grande en equipos y capacidades de gestión de red. Sin embargo, su escalabilidad y capacidad para satisfacer las demandas futuras pueden compensar estos costos adicionales.

En última instancia, la elección entre XGS-PON y NG-PON2 dependerá de varios factores, como la densidad de usuarios, las necesidades actuales y futuras de ancho de banda, los costos y la capacidad de gestión. Ambas tecnologías representan avances significativos en las redes de acceso de fibra óptica y ofrecen soluciones sólidas para diferentes escenarios y requerimientos.

#### **3.1.1.1 ANÁLISIS DE ARQUITECTURA Y FUNCIONAMIENTO.**

En términos de arquitectura, tanto XGS-PON como NG-PON2 reutilizan la red de distribución óptica (ODN) existente de G-PON que se encuentra desplegada casi en su mayoría alrededor de todo el mundo. Además, ambas tecnologías pueden utilizar

extensores de alcance para lograr una mayor cobertura si así lo requieren. También ambas tecnologías funcionan con la técnica TDM para el tráfico descendente y la técnica TDMA para el tráfico ascendente.

Las principales diferencias radican en las OLT y ONU que utilizan cada tecnología. Debido a que la tecnología NG-PON2 usa la técnica TWDM (donde se utilizan hasta ocho longitudes de onda), sus transmisores y receptores deben ser sintonizables, es decir deben admitir múltiples longitudes de onda. Por otro lado, en el caso de XGS-PON, esta tecnología está ligada a una sola longitud de onda de subida y una de bajada por lo que no se utiliza transmisores ni receptores sintonizables, sino que se utiliza transmisores y receptores similares a tecnologías PON anteriores, pero con mayor capacidad de transmisión.

### **3.1.1.2 ANÁLISIS DE VELOCIDADES DE TRANSMISIÓN.**

XGS-PON ofrece dos opciones de velocidad las cuáles son: una velocidad nominal de 10 Gbps tanto para el enlace de bajada como el de subida y otra de 10 Gbps de bajada y 2.5 Gbps de subida cuando coexiste con sistemas PON heredados.

Mientras tanto, NG-PON2 al ser una tecnología TWDM PON puede soportar hasta 40 Gbps de capacidad agregada para el enlace de bajada y 10 Gbps para el enlace de subida. Además, por cada par de longitudes de onda (ascendente/ descendente) puede soportar velocidades de 10 Gbps o 2.5 Gbps

Se puede observar claramente que NG-PON2 tiene velocidades de transmisión más elevadas que XGS-PON y además posee distintas configuraciones de estas.

### **3.1.1.3 ANÁLISIS DE ALCANCE**

En términos de alcance físico de la fibra, XGS-PON tiene un alcance mínimo de 20 km mientras que NG-PON2 tiene un alcance mínimo de 40 km puntualizar cómo se consigue aumentar este alcance. Ambas tecnologías tienen un alcance máximo de 60 km utilizando extensores de alcance.

Además, las dos tecnologías poseen una distancia máxima diferencial de fibra de 40 km

### **3.1.1.4 COMPARACIÓN DE LONGITUDES DE ONDA DE OPERACIÓN**

En la Tabla 3.1 se sintetiza las longitudes de onda de operación de XGS-PON y NG-PON2 en base a lo indicado en el capítulo 2.

**Tabla 3.1.** Longitudes de onda para de XGS-PON y NG-PON2.

Tipo de enlace	Tecnología			
	XGS-PON		NG-PON2	
	Conjunto Básico	Conjunto Opcional	Opción TWDM PON	Opción PtP WDM PON
Downlink	1575-1580 nm (1577 nm)	1480-1500 nm (1490 nm)	1596-1603 nm	
Uplink	1260-1280 nm (1270 nm)	1300-1320 nm (1310 nm)	Banda ancha: 1524-1544 nm Banda reducida: 1528-1540 nm Banda estrecha: 1532-1540 nm	Espectro expandido: 1524-1625 nm Espectro compartido: 1603-1625 nm

Como se puede observar XGS-PON está regido a una longitud de onda de subida y una longitud de bajada dependiendo del conjunto que se utilice, mientras que NG-PON2 posee una alta gama de longitudes de onda para su operación. Ambas tecnologías permiten diferentes opciones de longitud de onda para la coexistencia con generaciones PON anteriores.

### 3.1.1.5 ANÁLISIS FIBRA ÓPTICA

Tanto XGS-PON como NG-PON2 utilizan la fibra óptica monomodo estándar definida en la norma ITU-T G.652 para el despliegue de la red feeder y la red de distribución de sus respectivos sistemas, mientras que para la sección de cableado interior o la sección drop suelen utilizar la fibra óptica monomodo insensible a pérdidas por flexión definida en la norma ITU-T G.657.

### 3.1.1.6 ANÁLISIS DE RELACIÓN DE DIVISIÓN DE LOS SPLITTERS

NG-PON2 tiene una relación de división de los splitters más elevada que XGS-PON. La tecnología XGS-PON tiene una relación mínima de división de los splitters de 1:128 y una relación máxima de 1:256, mientras que la tecnología NG-PON2 tiene una relación mínima de división de los splitters de 1:256, con capacidad de tasas más elevadas si en el futuro la demanda así lo requiere.

### 3.1.1.7 ANÁLISIS SERVICIOS SOPORTADOS

El soporte de los servicios depende de las velocidades de transmisión ofrecidas por las tecnologías y su capacidad de manejo de estos. XGS-PON y NG-PON2, al ser tecnologías de nueva generación con altas velocidades de transmisión, pueden manejar todos los servicios que ofrecían las tecnologías PON anteriores dentro de los cuales se tiene:

- Telefonía
- Línea dedicada
- Internet de alta velocidad
- Red troncal de telefonía móvil
- Servicios IP
- Televisión en tiempo real

### 3.1.1.8 ANÁLISIS DE NIVELES DE POTENCIA OLT Y ONU

La comparación de los niveles de potencia de la OLT y la ONU entre XGS-PON y NG-PON2 se realizan para las velocidades de 10 Gbps tanto en sentido descendente como sentido ascendente y con las potencias de la opción TWDM de NG-PON2. Se realiza esta comparación ya que XGS-PON trabaja principalmente con estas velocidades. Además, en la opción TWDM de NG-PON2 para el enlace ascendente se toma en cuenta las potencias con enlace tipo A.

**Tabla 3.2.** Niveles de potencia de la OLT y la ONU de XGS-PON y NG-PON2, enlace descendente de 10 Gbps.

Ítem	Unidad	XGS-PON			NG-PON2		
		N1	N2	E1	N1	N2	E1
<b>OLT</b>							
Potencia mínima de lanzamiento	dBm	+2	+4	+6	+3	+5	+7
Potencia máxima de lanzamiento	dBm	+5	+7	+9	+7	+9	+11
<b>ONU</b>							
Sensibilidad	dBm	-28	-28	-28	-28	-28	-28
Sobrecarga	dBm	-9	-9	-9	-7	-7	-7

**Tabla 3.3.** Niveles de potencia de la OLT y la ONU de XGS-PON y NG-PON2, enlace ascendente de 10 Gbps

Ítem	Unidad	XGS-PON			NG-PON2		
		N1	N2	E1	N1	N2	E1
<b>ONU</b>							
Potencia mínima de lanzamiento	dBm	+4	+4	+4	+4	+4	+4

Potencia máxima de lanzamiento	dBm	+9	+9	+9	+9	+9	+9
<b>OLT</b>							
Sensibilidad	dBm	-26	-28	-30	-26	-28	-30.5
Sobrecarga	dBm	-5	-7	-9	-5	-7	-9

Como se puede observar en las Tablas 3.2 y 3.3, se identifica que la diferencia de potencias de lanzamiento es prácticamente despreciable en el enlace ascendente mientras que en enlace descendente si existe una ligera diferencia de potencias de lanzamiento. En el enlace descendente, se observa una diferencia de 1 dB entre las distintas clases de ODN para la potencia mínima de lanzamiento de la OLT y una diferencia de 2 dB para la potencia máxima de lanzamiento de la OLT. En cambio, en la ONU existe una diferencia de 2 dB en la sobrecarga mientras que para la sensibilidad no existe diferencia alguna.

Se observa que NG-PON2 tiene potencias de lanzamiento mayores que XGS-PON en el enlace descendente y tiene una mayor tolerancia a la sobrecarga en la ONU.

### 3.1.1.9 ANÁLISIS DE CLASES DE ODN

NG-PON2 conserva las mismas clases de ODN que XGS-PON cuando XGS-PON trabaja con el conjunto básico de longitudes onda. Sin embargo, XGS-PON tiene 2 clases de ODN adicionales para el conjunto opcional de longitudes de onda, las cuales sirven para la coexistencia con generaciones PON anteriores. Esto se puede evidenciar en la Tabla 3.4, en la cual se detalla las clases de ODN recomendadas para XGS-PON y NG-PON2.

**Tabla 3.4.** Clases de ODN para XGS-PON y NG-PON2.

Parámetro	XGS-PON						NG-PON2			
	Conjunto básico de longitudes de onda				Conjunto Opcional de longitudes de onda		N1	N2	E1	E2
	N1	N2	E1	E2	B+	C+	N1	N2	E1	E2
Pérdida mínima (dB)	14	16	18	20	13	17	14	16	18	20
Pérdida máxima (dB)	29	31	33	35	28	32	29	31	33	35

NG-PON1 Y NG-PON2 presentan la capacidad de coexistir con generaciones anteriores, ya que sus rangos de operación están fuera del espectro de las tecnologías PON previas. La coexistencia con generaciones anteriores en ambas tecnologías se logra mediante el uso de elementos multiplexores/demultiplexores específicos. En el caso de XGS-PON, se emplea el componente WDM1r, mientras que para NG-PON2 se utiliza el elemento CEx. Estos componentes posibilitan una integración sin inconvenientes de las nuevas tecnologías en entornos donde coexisten con tecnologías PON anteriores.

En lo que respecta a los escenarios de migración, tanto XGS-PON como NG-PON2 ofrecen las opciones de migración brownfield y greenfield:

**Migración Brownfield:** Este escenario implica la actualización y migración de la tecnología PON heredadas a XGS-PON o NG-PON2 en infraestructuras ya existentes. La coexistencia y reutilización de activos físicos como cables y divisores optimizan los recursos y reducen los costos de migración.

**Migración Greenfield:** En este caso, se implementa la nueva tecnología, ya sea XGS-PON o NG-PON2, en redes nuevas o en áreas de expansión sin la presencia de tecnologías PON anteriores. Esto ofrece la ventaja de diseñar la red desde cero, optimizando la integración de la tecnología seleccionada.

En conjunto, estas tecnologías proporcionan soluciones versátiles y flexibles para la coexistencia, migración y actualización de redes PON, permitiendo a los proveedores de servicios adaptarse de manera eficiente a las demandas cambiantes y aprovechar las ventajas de las nuevas capacidades y velocidades.

## 3.2 CONCLUSIONES

En el marco de este trabajo de integración curricular, se ha llevado a cabo un análisis técnico comparativo exhaustivo entre las redes de acceso XGS-PON y NG-PON2, siguiendo las recomendaciones proporcionadas por la ITU para cada una de estas tecnologías. A través de este análisis, se han alcanzado las siguientes conclusiones:

El análisis técnico reveló que tanto XGS-PON como NG-PON2 son capaces de soportar servicios similares y cumplir con requerimientos de transmisión de señal en una red PON con un retardo de 1.5 ms. Sin embargo, NG-PON2 sobresale al poder gestionar la capacidad de la PON mediante múltiples longitudes de onda, lo que permite redistribuir la capacidad según la demanda cambie y se diversifiquen los servicios. En contraste, XGS-PON está limitada a una longitud de onda y una capacidad máxima.

En términos de aplicabilidad, XGS-PON está dirigida principalmente al sector empresarial, ofreciendo velocidades de línea simétricas cruciales para comunicación en tiempo real y transmisión de datos. Por otro lado, NG-PON2 se orienta hacia usuarios residenciales, soporte de backhaul móvil y nuevas tecnologías como IoT y 5G, todas las cuales demandan mayor ancho de banda y velocidades de transmisión.

Desde una perspectiva arquitectónica, se pudo observar que NG-PON2 se presenta como una tecnología más desafiante de implementar. Esto se debe a que es la primera red de acceso en adoptar la tecnología TWDM, lo cual implica la incorporación de transmisores y receptores sintonizables en su estructura. En contraste, XGS-PON utiliza longitudes de onda separadas para enlace de bajada y enlace de subida, aprovechando transmisores y receptores ya existentes en redes anteriores, aunque con mejoras en su capacidad. La introducción de componentes sintonizables aumenta los costos de implementación de NG-PON2, dado su mayor nivel de complejidad en la fabricación.

En relación a la capacidad de albergar usuarios en la red PON, NG-PON2 supera a XGS-PON gracias a sus relaciones de división de splitters más amplias. Sin embargo, es importante considerar también el número de puertos en las OLTs.

Los requisitos del sistema para ambas tecnologías son en su mayoría similares, ya que ambas son redes de nueva generación y deben cumplir con criterios como eficiencia energética, asignación dinámica de ancho de banda, seguridad y resiliencia. Sin embargo, es vital señalar que, en términos de seguridad ocular, se debe tener mayor precaución con NG-PON2 debido a sus mayores potencias de lanzamiento en comparación con XGS-PON.

Dado que tanto NG-PON2 como XGS-PON utilizan longitudes de onda fuera del espectro asignado a G-PON y video RF, estas tecnologías pueden coexistir en la misma fibra. Esta coexistencia permite a los usuarios acceder a una variedad más amplia de servicios y opciones de velocidad, superando las limitaciones de las redes PON previas.

En resumen, este análisis comparativo brinda una comprensión detallada de las tecnologías XGS-PON y NG-PON2, destacando sus ventajas y consideraciones clave para su implementación y aplicabilidad en diversos contextos.

### 3.3 RECOMENDACIONES

Luego de completar un exhaustivo análisis técnico comparativo entre XGS-PON y NG-PON2, se presentan las siguientes recomendaciones que ayudarán a profundizar en la comprensión de estas tecnologías:

**Análisis de Factibilidad Económica y Legal:** Se sugiere llevar a cabo un análisis detallado de viabilidad económica y legal tanto para XGS-PON como NG-PON2. Esto permitirá evaluar la viabilidad financiera de implementar estas tecnologías en el contexto del país y también considerar cualquier implicación legal relevante.

**Comparación Técnica con 50G-EPON:** Es recomendable realizar un análisis técnico comparativo entre las redes de acceso NG-PON2 y 50G-EPON. Este estudio permitirá identificar las mejoras y ventajas específicas que la última actualización de redes de acceso (50G-EPON) ofrece en relación con NG-PON2.

**Análisis de Capa de Convergencia de Transmisión:** Se propone llevar a cabo un análisis técnico comparativo a nivel de la capa de convergencia de transmisión entre ambas tecnologías. Esto ayudará a entender las diferencias o similitudes en esta capa y a enriquecer el estudio con información relevante.

**Estudio de la Opción PtP de NG-PON2:** Es recomendable realizar un estudio exhaustivo sobre la viabilidad y aplicabilidad de la opción de Punto a Punto (PtP) en NG-PON2 en comparación con la tecnología TWDM. Explorar en qué contextos y escenarios la tecnología PtP es más adecuada brindará una comprensión completa de sus posibilidades.

**Duplicación de Análisis Económico y Legal:** Se recomienda duplicar el análisis de factibilidad económica y legal tanto para XGS-PON como NG-PON2. Este análisis adicional contribuirá a una evaluación más sólida de la viabilidad de implementar estas tecnologías en el país.

**Comparación con 50G-EPON (Continuación):** Siguiendo la recomendación previa, se sugiere completar la comparación técnica entre las redes de acceso NG-PON2 y 50G-EPON. Detallar las mejoras específicas de 50G-EPON en relación con NG-PON2 brindará una visión completa de las opciones disponibles.

Estas recomendaciones complementarán y enriquecerán el análisis técnico comparativo realizado entre XGS-PON y NG-PON2, proporcionando una visión más profunda de las tecnologías y sus aplicaciones en el contexto local.

### 3.4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Informe anual de Internet de Cisco, Informe técnico. Disponible en línea: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html>
- [2] Horvath, T., Oujezsky, V., Munster, P. and Bao, N., 2020. Passive Optical Networks Progress: A Tutorial. 1st ed. [ebook] Czech Republic: Electronics 2020, p.2,14 Available at: <https://doi.org/10.3390/electronics9071081>.
- [3]"Boletín estadístico: Servicio de acceso a internet – noviembre", Arcotel.gob.ec, 2020. [Online]. Available: <https://www.arcotel.gob.ec/wp-content/uploads/2020/12/BOLETIN-NOVIEMBRE-2020-25-11-2020.pdf>.
- [4]G.983.1: Sistemas de acceso óptico de banda ancha basados en redes ópticas pasivas (PON). Disponible en Línea: <https://bit.ly/2AZscPE>
- [5]"Gigabit-capable passive optical networks (GPON): General characteristics", [Online]. Available: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.984.1-200803-I/en>.
- [6] "G.987. 10-Gigabit-capable passive optical networks (XG-PON): General requirements", [Online]. Available: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.987.1-201603-I/en>.
- [7]" G.9870.1: 10-Gigabit-capable symmetric passive optical network (XGS-PON). Intellectual Property rights in ITU-T [en línea]. En vigor desde febrero 2016. Disponible en: [http://www.itu.int/itu-t/workprog/wp\\_item.aspx?isn=10591](http://www.itu.int/itu-t/workprog/wp_item.aspx?isn=10591)
- [8] " ITU G.989.1: Redes ópticas pasivas con capacidad para 40 Gigabits (NG-PON2): Requisitos generales. Disponible en línea: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.989.1/e>
- [9] (Chapter No. 3.2) Advanced architectures for PON supporting Fi-Wi convergence.
- [10]R. Llugsi, Fundamentos de Transmisión Digital, 1st ed. pp. 19, 20, 86
- [11] T. Wayne, Sistemas de Comunicaciones Electrónicas, 4th ed. México: Pearson Education, 2003, p. 444.
- [12]G. Bijani Chiquero, "UF1872 - Implantación y configuración de pasarelas", Google Books, 2021. [Online]. Available: <https://books.google.com.ec/books?id=yblWDwAAQBAJ&pg=PA96&dq=olt+funciones&hl=en&sa=X&ved=2ahUKEwi748qp9vbwAhWzsDEKHaleBuUQ6AEwAXoECAMQAg#v=onepage&q=olt%20funciones&f=true>.

- [13]"IEEE - The world's largest technical professional organization dedicated to advancing technology for the benefit of humanity.", [IEEE.org](https://www.ieee.org), 2021. [Online]. Available: <https://www.ieee.org>.
- [14] G. Kramer, Ethernet Passive Optical. USA: McGraw-Hill Professional Engineering, 2005, p. 11.
- [15] ITU G.989.2, "40-Gigabit-capable passive optical networks 2 (NG-PON2): Physical media dependent (PMD) layer specification," [Online]. Available: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.989.2-201902-1>
- [16] B. Mukherjee, I. Tomkos, M. Tornatore, P. Winzer y Y. Zhao, Eds., Springer Handbook of Optical Networks. Cham: Springer International Publishing, 2020.
- [17] Recommendation ITU-T G.989.2. 40-Gigabit-capable passive optical networks 2 (NG-PON2): Physical media dependent (PMD) layer specification. 12/2014
- [18] Recommendation ITU-T G.989.1. 40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): General requirements. 03/2013