

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y
ELECTRÓNICA**

**ANÁLISIS TÉCNICO COMPARATIVO DE LAS REDES DE ACCESO
ÓPTICAS PASIVAS DE NUEVA GENERACIÓN**

**ANÁLISIS TÉCNICO COMPARATIVO ENTRE LAS REDES DE
ACCESO 50G-EPON y NG-PON2**

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

ANDY FERNANDO MOSQUERA CASAMÍN

andy.mosquera@epn.edu.ec

DIRECTOR: M.Sc. MARÍA SOLEDAD JIMÉNEZ JIMÉNEZ

maria.jimenez@epn.edu.ec

DMQ, febrero 2022

CERTIFICACIONES

Yo, ANDY FERNANDO MOSQUERA CASAMÍN 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.



ANDY FERNANDO MOSQUERA CASAMÍN

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por ANDY FERNANDO MOSQUERA CASAMÍN, bajo mi supervisión.

M.Sc. MARÍA SOLEDAD JIMÉNEZ JIMÉNEZ
DIRECTOR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el producto resultante del mismo, es público y estará 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.

ANDY FERNANDO MOSQUERA CASAMÍN

M.Sc. MARÍA SOLEDAD JIMÉNEZ JIMÉNEZ

DEDICATORIA

El presente trabajo de integración curricular va dedicado:

A Dios, por darme salud y vida para cumplir con todos mis objetivos propuestos.

A mis padres, María Casamín y Carlos Mosquera, por sus esfuerzos y sacrificios realizados para que nunca me falte nada, por sus consejos y sobre todo por su amor y apoyo incondicional en todos los momentos de mi vida.

A mis hermanos, Juan, Oscar, Pablo, Wilson y Darío, por sus enseñanzas, por motivarme a seguir adelante y porque siempre han estado y están dispuestos a ayudarme.

A mis sobrinos, Kerly, Matías, Alejandro, Steeven, Mayte, Martín y Sebastián, por ser mi fuente de inspiración para poder afrontar los momentos más difíciles, por las alegrías brindadas y por el cariño mutuo que siempre ha existido.

A mi novia, Rosa Fonseca por su amor, ayuda y comprensión durante todos estos años juntos.

Andy Mosquera Casamín

AGRADECIMIENTO

Agradezco a todos los integrantes de mi familia por su constante apoyo y motivación para lograr siempre mis objetivos y nunca rendirme.

Agradezco a mi tutora, la M.Sc. María Soledad Jiménez por la confianza brindada, por su apoyo y sobre todo por haberme guiado de la mejor manera durante el desarrollo del presente trabajo de integración curricular.

Andy Mosquera Casamín

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
RESUMEN	VIII
ABSTRACT	IX
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 OBJETIVO GENERAL	2
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
1.3 ALCANCE	2
1.4 MARCO TEÓRICO.....	3
1.4.1 REDES DE ACCESO BASADAS EN FIBRA ÓPTICA	3
1.4.2 REDES DE ACCESO ÓPTICAS PASIVAS.....	4
1.4.2.1 Elementos de una red PON	4
1.4.2.2 Parámetros asociados a la fibra óptica	5
1.4.2.2.1 Ventanas de transmisión y bandas de operación	5
1.4.2.2.2 Dispersión de la fibra óptica	5
1.4.2.2.3 Tipo de fibra óptica para redes PON	6
1.4.2.3 Tecnologías PON precursoras.....	6
1.4.2.3.1 Redes GPON	7
1.4.2.3.2 Redes GEAPON	9
2. METODOLOGÍA.....	11
2.1 REDES DE ACCESO 50G-EPON.....	11
2.1.1 ARQUITECTURA DE 50G-EPON.....	12
2.1.1.1 Capa física de 50G-EPON.....	13
2.1.1.2 Capa de enlace de datos de 50G-EPON	14
2.1.2 SUBCAPA PMD DE 50G-EPON.....	15
2.1.2.1 Clases de PMD de 50G-EPON.....	15
2.1.2.1.1 Velocidades de transmisión de 50G-EPON.....	15
2.1.2.1.2 Clases de ODN de 50G-EPON.....	15
2.1.2.1.3 Dirección de transmisión de 50G-EPON.....	15
2.1.2.1.4 Tipo de coexistencia con 50G-EPON	16
2.1.2.1.5 Código de línea de 50G-EPON	16

2.1.2.2	Plan de longitud de onda de 50G-EPON	16
2.1.2.3	Combinaciones permitidas (PMD OLT y PMD ONU) de 50G-EPON ...	17
2.1.2.4	Tipos de enlaces físicos de 50G-EPON.....	17
2.1.2.5	Puntos de referencia de la subcapa PMD de 50G-EPON	19
2.1.3	COEXISTENCIA DE 50G-EPON	20
2.1.3.1	Coexistencia entre 50G-EPON y tecnologías heredadas GPON o GEPON	21
2.1.3.2	Coexistencia entre 50G-EPON y tecnologías heredadas 10G-EPON ..	21
2.2	REDES DE ACCESO NG-PON2	22
2.2.1	ARQUITECTURA DE NG-PON2	23
2.2.2	TECNOLOGÍAS DE NG-PON2.....	25
2.2.2.1	TWDM	26
2.2.2.2	PtP WDM.....	26
2.2.3	SUBCAPA PMD DE NG-PON2	28
2.2.3.1	Clases de ODN de NG-PON2.....	28
2.2.3.2	Velocidades de transmisión de NG-PON2	28
2.2.3.3	Plan de longitud de onda de NG-PON2	30
2.2.3.4	Tiempos de sintonización de las ONU en NG-PON2	32
2.2.3.5	Tipos de enlaces físicos de NG-PON2	32
2.2.4	MIGRACIÓN Y COEXISTENCIA DE NG-PON2	33
2.2.4.1	Escenarios de migración a NG-PON2	33
2.2.4.2	Rutas de migración a NG-PON2.....	34
2.2.4.3	Coexistencia entre NG-PON2 y tecnologías PON heredadas.....	35
3.	RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	37
3.1	ANÁLISIS TÉCNICO COMPARATIVO ENTRE LAS REDES 50G-EPON Y NG-PON2.....	37
3.1.1	ESTANDARIZACIÓN.....	37
3.1.2	ARQUITECTURA	38
3.1.3	CLASES DE ODN	39
3.1.4	PLAN DE LONGITUD DE ONDA.....	40
3.1.5	VELOCIDADES DE TRANSMISIÓN.....	41
3.1.6	ALCANCES Y RELACIÓN DE DIVISIÓN DE LOS SPLITTER.....	43
3.1.7	TIPO DE FIBRA ÓPTICA.....	43
3.1.8	CARACTERÍSTICAS ADICIONALES	45
3.2	CONCLUSIONES.....	48
3.3	RECOMENDACIONES	50
4.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52

5. ANEXOS.....	55
ANEXO I. Características de las fibras G.652.D y G.657.A	55
ANEXO II. Especificaciones ópticas para la transmisión y recepción de datos entre la subcapa PMD de 50G-EPON y su interfaz MDI.....	57
ANEXO III. Parámetros de la interfaz óptica de la subcapa PMD de NG-PON2 (TWDM)	65
ANEXO IV. Parámetros de la interfaz óptica de la subcapa PMD de NG-PON2 (PtP WDM).....	72

RESUMEN

En el presente trabajo de integración curricular se realiza un análisis técnico comparativo entre las redes de acceso ópticas pasivas 50G-EPON (*50 Gigabit Ethernet Passive Optical Network*) y NG-PON2 (*Next Generation Passive Optical Network 2*). A continuación, se describe el contenido de cada uno de los capítulos que constituyen este trabajo.

En el primer capítulo se detallan los aspectos generales de las redes de acceso basadas en fibra óptica, específicamente de las redes ópticas pasivas (PON). De igual manera, se expone las características principales de las redes GPON (*Gigabit Capable Passive Optical Network*) y GEPON (*Gigabit Ethernet Passive Optical Network*), tecnologías precursoras y mayormente desplegadas e implementadas alrededor del mundo.

En el segundo capítulo, a partir de los estándares IEEE 802.3ca e ITU-T G989.x desarrollados por el IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) y ITU (*International Telecommunication Union*) respectivamente, se presenta un estudio detallado de las características generales y especificaciones de la subcapa PMD (*Physical Medium Dependent*) de las redes de nueva generación 50G-EPON y NG-PON2. Adicionalmente, se expone la posibilidad de coexistencia de dichas redes de acceso con sus correspondientes tecnologías PON predecesoras.

En el tercer capítulo, en base a los resultados de los capítulos anteriores, se realiza el análisis técnico comparativo entre las redes de acceso antes mencionadas, en donde se comparan aspectos como: la arquitectura, clases de ODN, velocidades de transmisión, planes de longitud de onda, etc. También, en dicho capítulo se incluyen las conclusiones y recomendaciones obtenidas del análisis técnico comparativo desarrollado.

PALABRAS CLAVE: IEEE 802.3ca, ITU-T G989.x, 50G-EPON, NG-PON2, PON.

ABSTRACT

In this curricular integration work, a comparative technical analysis is carried out between the passive optical access networks 50G-EPON (50 Gigabit Ethernet Passive Optical Network) and NG-PON2 (Next Generation Passive Optical Network 2). The content of each of the chapters that make up this work is described below.

The first chapter details the general aspects of fiber optic-based access networks, specifically passive optical networks (PON). In the same way, the main characteristics of the GPON (Gigabit Capable Passive Optical Network) and GEPON (Gigabit Ethernet Passive Optical Network) networks, precursor technologies and mostly deployed and implemented around the world, are exposed.

In the second chapter, based on the IEEE 802.3ca and ITU-T G989.x standards developed by the IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) y ITU (International Telecommunication Union) respectively, a detailed study of the general characteristics and specifications of the PMD (Physical Medium Dependent) sublayer of the new generation networks 50G-EPON and NG-PON2. Additionally, the possibility of coexistence of said access networks with predecessor PON technologies is exposed.

In the third chapter, based on the results of the previous chapters, a comparative technical analysis is carried out between the access networks, where aspects such as: architecture, ODN classes, transmission speeds, wavelength plans, etc. are compared. Also, this chapter includes the conclusions and recommendations obtained from the comparative technical analysis developed.

KEYWORDS: IEEE 802.3ca, ITU-T G989.x, 50G-EPON, NG-PON2, PON.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, los servicios de telecomunicaciones han tenido un crecimiento exponencial en las capacidades y funcionalidades que proporcionan, ya que, al emplear aplicaciones, como: llamadas de voz, mensajería, videoconferencias, videojuegos en línea, etc., las cuales, para su correcto funcionamiento, requieren cada vez más, de grandes anchos de banda y mayores velocidades de transmisión de datos. De igual manera, las redes de telecomunicaciones han ido cambiando con el pasar del tiempo, partiendo de las tradicionales redes basadas en par de cobre hasta redes de gran capacidad que emplean como medio de transmisión la fibra óptica [1].

Por lo tanto, para satisfacer con los requerimientos de los servicios telemáticos citados anteriormente, las distintas organizaciones e instituciones de telecomunicaciones, como la ITU (*International Telecommunication Union*) y el IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*), han planteado como solución, el desarrollo de varios estándares, dentro de los cuales se definen las diferentes tecnologías para las redes PON (*Passive Optical Network*).

El presente trabajo de integración curricular se basará en un análisis técnico comparativo de las redes de acceso ópticas pasivas 50G-EPON (*50 Gigabit Ethernet Passive Optical Network*) y NG-PON2 (*Next Generation Passive Optical Network 2*). Las cuales están definidas por los estándares IEEE 802.3ca e ITU-T G.989.x respectivamente [2], [3].

Los nuevos estándares desarrollados por estas organizaciones tienen como característica principal, el constante aumento de la velocidad de transmisión en comparación a las tecnologías de acceso tradicionales. Por ejemplo, el estándar IEEE 802.3ca, aprobado en el 2020, define velocidades de transmisión de 50Gbps en *downlink* y 10Gbps, 25Gbps o 50Gbps en *uplink* [3]. De igual manera, en relación con el modelo OSI (*Open Systems Interconnection*), dicho estándar trabaja solamente en las dos primeras capas, es decir, la capa física y la capa de enlace de datos, el enfoque principal de este trabajo de integración curricular será la capa física, específicamente la subcapa PMD (*Physical Medium Dependent*).

Por su parte, el estándar ITU-T G.989.x ($x = 1, 2, 3$) ofrece una capacidad de hasta 40Gbps. Dicho estándar se divide en 3 recomendaciones: la ITU-T G.989.1, que define los requerimientos generales, la ITU-T G.989.2 que define las especificaciones de la subcapa PMD, enfoque principal de este trabajo de integración curricular y, por último, la ITU-T

G.989.3 que especifica las características de la capa TC (*Transmission Convergence*) [4], [5].

El análisis técnico comparativo que se realizará en el presente trabajo de integración curricular proporcionará una guía de los aspectos técnicos fundamentales que rigen las tecnologías de redes de acceso ópticas pasivas 50G-EPON y NG-PON2. De igual manera, a través del análisis técnico se determinará cuál de las tecnologías antes mencionadas, presenta las mejores características y prestaciones o implica una mayor limitación. Por lo tanto, el presente trabajo, también, servirá como guía para futuras investigaciones o diseños, con el propósito de un posible despliegue e implementación de cualquiera de estas dos tecnologías de acceso en el país.

1.1 OBJETIVO GENERAL

Efectuar un análisis técnico comparativo, basado en los parámetros fundamentales que se consideran en los estándares de las redes de acceso ópticas pasivas 50G-EPON y NG-PON2.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Estudiar, a nivel de capa física, las tecnologías de acceso ópticas pasivas 50G-EPON y NG-PON2, concretamente los requerimientos generales y especificaciones de la subcapa PMD.
2. Describir y detallar, en base a los estándares IEEE 802.3ca e ITU-T G.989.x, los principales parámetros técnicos (longitudes de onda utilizadas, velocidades de transmisión, alcances, relación de división de los *splitter*, etc.) de las tecnologías 50G-EPON y NG-PON2.
3. Realizar un análisis técnico comparativo entre las tecnologías de redes de acceso 50G-EPON y NG-PON2, con la finalidad de determinar las diferencias, la posibilidad de coexistencia, limitaciones y beneficios que podrían proveer dichas redes de acceso.

1.3 ALCANCE

Se realizará un análisis técnico comparativo de las tecnologías de redes de acceso ópticas pasivas 50G-EPON y NG-PON2. Para lo cual, se tomará como referencia los estándares IEEE 802.3ca e ITU-T G.989.x, respectivamente.

Además, el estudio de las tecnologías previamente mencionadas estará enfocado a la capa física, concretamente a los requerimientos generales y especificaciones de la subcapa PMD. Luego del estudio, se realizará el análisis técnico comparativo entre las tecnologías

50G-EPON y NG-PON2, con la finalidad, de determinar las diferencias, ventajas, desventajas, limitaciones, etc.; así como su posible coexistencia con otras tecnologías de acceso ópticas pasivas, tales como; GPON (*Gigabit Capable Passive Optical Network*) y 10G-EPON (*10 Gigabit Ethernet Passive Optical Network*).

Finalmente, el trabajo de integración curricular que se propone no incluirá ningún tipo de diseño o estudios de factibilidad (técnica, legal o económica). Tampoco se generará un producto final demostrable.

1.4 MARCO TEÓRICO

1.4.1 REDES DE ACCESO BASADAS EN FIBRA ÓPTICA

En la actualidad, la demanda del ancho de banda ha incrementado constantemente, debido al surgimiento de nuevas aplicaciones o servicios de telecomunicaciones que requieren mayores velocidades de transmisión. Por lo tanto, para brindar el acceso a los usuarios a estos servicios, es necesario utilizar redes de acceso con mayor capacidad.

Los requerimientos de estos servicios, únicamente puede ser solventados por medio de redes de acceso que empleen como medio de transmisión la fibra óptica, ya que en comparación con las redes de acceso tradicionales basadas en cobre¹, la fibra óptica ofrece varias ventajas y beneficios, tales como: grandes anchos de banda, distancias de transmisión más extensas, inmunidad a interferencias electromagnéticas, mayor seguridad, etc. [6].

Además, las redes de acceso basadas en fibra se clasifican en dos grandes clases: Redes Ópticas Activas (AON, *Active Optical Network*)² y Redes Ópticas Pasivas (PON, *Passive Optical Network*).

Por lo tanto, es importante mencionar que, de acuerdo con el alcance, el presente trabajo de integración curricular se enfocará en las redes PON, específicamente en el estudio y análisis de los requerimientos generales de la subcapa PMD de las redes de acceso 50G-EPON y NG-PON2.

¹ *Redes de acceso de cobre*, son redes que permiten la transmisión de voz, datos y video con bajas velocidades y cortos alcances, por medio de cobre. Las redes de cobre más conocidas son: ADSL (*Asymmetric Digital Subscriber Line*), HFC (*Hybrid Fiber Coaxial*), etc.

² *Active Optical Network*, son aquellas redes punto a punto que entre la central y el usuario usan elementos ópticos activos como, por ejemplo: switches, amplificadores, módulos, receptores, etc., los cuales requieren de energía eléctrica para su funcionamiento.

1.4.2 REDES DE ACCESO ÓPTICAS PASIVAS

Son redes constituidas principalmente por elementos ópticos pasivos, los cuales para su funcionamiento no requieren de energía eléctrica. Sin embargo, tanto en la central como en el domicilio del usuario se emplean elementos activos. Además, las PON son redes punto a multipunto, es decir un mismo hilo de fibra óptica puede ser compartido entre varios usuarios.

1.4.2.1 Elementos de una red PON

Tal como se observa en la figura 1.1, básicamente una red PON está conformada por tres elementos fundamentales [7]:

- OLT (*Optical Line Terminal*): Es un elemento óptico activo, ubicado en la sección del proveedor. Su función principal es gestionar y controlar la información que se transmite en ambos sentidos (*downlink* y *uplink*) a través de la ODN (*Optical Distribution Network*).
- Splitter Óptico: Es un componente óptico pasivo, que permite dividir y distribuir la señal de luz de una fibra entre todos los usuarios que pertenecen a un mismo puerto de la OLT. Además, en una red PON puede existir uno o dos niveles de *splitting*, según el diseño de los proveedores.
- ONT/ONU (*Optical Network Terminal / Optical Network Unit*): Son elementos ópticos activos similares, situados en el domicilio de los usuarios. Su función es la de entregar la información proveniente de la OLT al usuario (*downlink*) o encapsular la misma proporcionada por el usuario y enviarla hacia la OLT (*uplink*). Sin embargo, técnicamente se diferencian en ciertos aspectos como: su procedencia, ya que el término ONT fue introducido por la ITU, mientras que el término ONU fue definido por el IEEE. Además, pueden diferenciarse por el número de puertos, debido a que las ONU poseen múltiples puertos, mientras que las ONT tienen un solo puerto, por tal motivo, también se las conoce como ONU de abonado único [8].

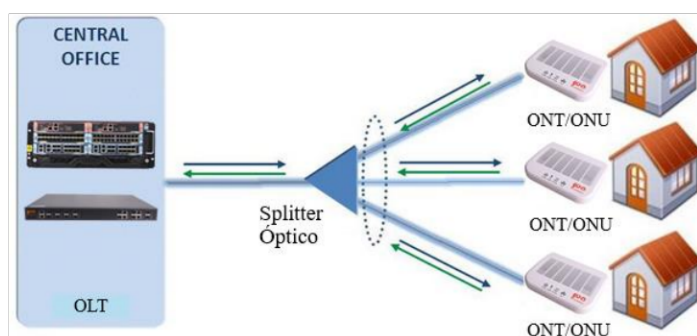


Figura 1.1. Elementos de una red PON [7].

1.4.2.2 Parámetros asociados a la fibra óptica

1.4.2.2.1 Ventanas de transmisión y bandas de operación

Para transmitir información por medio de fibra óptica, los pulsos de luz emplean esencialmente la región infrarroja, la cual abarca un rango de longitudes de onda desde 750nm a 1675nm [9]. Dentro de este rango existen secciones, llamadas ventanas de transmisión donde la atenuación es mínima. Por su parte, con la finalidad de estandarizar los rangos de longitudes de onda óptimas para la transmisión, la ITU ha introducido el término de bandas de operación.

A continuación, en la tabla 1.1. se detallan las características principales de las ventanas de transmisión y bandas de operación usadas en comunicaciones ópticas.

Tabla 1.1. Ventanas y bandas de la fibra óptica [9].

Ventana de Tx	Banda de Tx (ITU)	Rango λ [nm]	λ central [nm]	Atenuación [dB/km]	Tipo de fibra
1	-	820 - 880	850	2.50	MM
2	O	1260 - 1360	1310	0.34	MM y SM
-	E	1360 -1460	-	0.31	SM
5	S	1460 - 1530	1470	0.25	SM
3	C	1530 - 1565	1550	0.20	SM
4	L	1565 - 1625	1625	0.22	SM
-	U	1625 - 1675	-	-	SM

1.4.2.2.2 Dispersión de la fibra óptica

Un parámetro fundamental que se debe considerar en las redes que emplean fibra óptica es la dispersión, fenómeno que limita la capacidad máxima que por unidad de longitud se puede transmitir por una fibra. Además, la dispersión provoca que los pulsos se ensanchen llegando a sobrelaparse (ISI, *Inter Symbol Interference*), por ende, dicho fenómeno también limita la velocidad de transmisión máxima, debido a que los pulsos adyacentes no pueden ser diferenciados [9]. Existen diferentes tipos de dispersión, según la clase de fibra que se utilice. Las redes PON para sus despliegues emplean fibras monomodo SM (*Single Mode*).

Las fibras monomodo, son afectadas por dos tipos de dispersión: la primera es la dispersión cromática, formada por la suma de la dispersión de material o espectral más la dispersión de guía de onda. La dispersión de material o espectral es aquella provocada por los diversos retardos que experimentan las longitudes de onda (originadas por una fuente de luz) al transmitirse con diferentes velocidades [9]. Por su parte, la dispersión de guía de onda es originada debido al hecho de que el "80% de la energía se propaga a través del

núcleo de la fibra, mientras que el resto se propaga a una velocidad mayor por el manto” [9].

La segunda clase es la dispersión por modo de polarización (PMD, *Polarization Mode Dispersión*), provocada por asimetrías en el núcleo de la fibra, que genera diferencias en las velocidades de propagación de las componentes horizontales y verticales de un modo, a causa de un proceso de fabricación imperfecto [9].

1.4.2.2.3 Tipo de fibra óptica para redes PON

Los diferentes estándares que definen a las redes de acceso PON recomiendan que, para el despliegue de la red de distribución óptica, se emplee fibras monomodo SM (*Single Mode*) especificadas en la norma G.652 de la ITU-T, la cual dispone de cuatro subcategorías: la G.652.A, la G.652.B, la G.652.C y la G.652.D [9].

Para las redes de acceso PON se utiliza específicamente la fibra de subcategoría G.652.D, ya que, en comparación con las demás, este tipo de fibra es capaz de transmitir en diversas bandas de operación (desde la banda O hasta la banda L), además, presenta valores de atenuación y de dispersión por modo de polarización pequeños, los cuales se detalla en el Anexo I.

De igual manera, para conexiones de último tramo o para cableado dentro de la casa de los abonados, se requiere de fibras muy flexibles y resistentes a pérdidas producidas por macro curvaturas, por lo tanto, los estándares de las redes de acceso PON sugieren utilizar fibras monomodo especificadas en la norma G.657 de la ITU-T, la cual dispone de dos subcategorías: la G.657.A y la G.657.B [9].

Específicamente en este tipo de redes se usa la subcategoría G657.A (ver Anexo I), ya que es la única que posee compatibilidad de campo modal³ con la fibra G.652.D.

1.4.2.3 Tecnologías PON precursoras

Tal como se observa en la figura 1.2, las principales tecnologías PON desplegadas e implementadas masivamente alrededor del mundo para el año 2015 son GPON (color verde oscuro) y GEPON (color verde claro). Los despliegues de GEPON se encuentran distribuidos en las regiones de Asia, mientras que los despliegues de GPON se localizan generalmente en países de Europa, América, Oceanía y África [10], [11].

³ *Campo modal*, es la región de la fibra óptica monomodo por donde se transmite la luz, dicha región está formada por el núcleo y una parte del manto. Además, esta sección define el área efectiva.



Figura 1.2. Distribución de GPON y GEPON alrededor del mundo [10].

Sin embargo, es importante mencionar que muchos de los países que se observan sin colorear en la figura probablemente ya cuenten a la fecha con despliegues de alguna de las tecnologías PON mencionadas anteriormente, o a su vez ya dispongan de tecnologías PON de nueva generación.

1.4.2.3.1 Redes GPON

En el año 2004, la ITU definió el estándar GPON bajo la serie ITU-T G.984.x, ofreciendo como característica principal una estructura escalable con tasas de transmisión desde 622Mbps hasta 2.5Gbps, incluyendo la capacidad de soportar velocidades asimétricas. La configuración de velocidades establecida por el grupo FSAN (*Full Service Access Network*) y, por ende, la más utilizada por los proveedores es la de 2.5Gbps en *downstream* y 1.25Gbps en *upstream* [12].

Para proporcionar los servicios a los usuarios, en sentido descendente las redes GPON hacen uso de dos longitudes de onda: la de 1490nm (para transmisiones de voz y datos) y la de 1550nm (para transmisión de video RF) usando WDM (*Wavelength Division Multiplexing*)⁴.

Además, en *downlink* la OLT transmite la información en forma de broadcast a cada ONU, empleando la técnica de multiplexación TDM (*Time Division Multiplexing*)⁵. Por ende, cada ONU procesará solamente la información que le corresponde omitiendo la demás.

⁴ WDM, es una técnica de transmisión por fibra óptica, donde dos o más longitudes de onda de luz (colores) envían su información a través de un mismo medio.

⁵ TDM, es una técnica de multiplexación que divide el dominio del tiempo en ranuras (slots). Por ende, se puede transmitir múltiples señales a la vez, ya que, se asigna a cada señal un slot diferente.

Por su parte, en el sentido ascendente para el envío de información se emplea únicamente la longitud de onda de 1310nm y, además, se utiliza la técnica de acceso múltiple TDMA (*Time Division Multiple Access*)⁶ para asegurar transmisiones libres de colisiones desde las diferentes ONU a la OLT.

A continuación, en la figura 1.3 se observa el funcionamiento de la red GPON, descrito previamente.

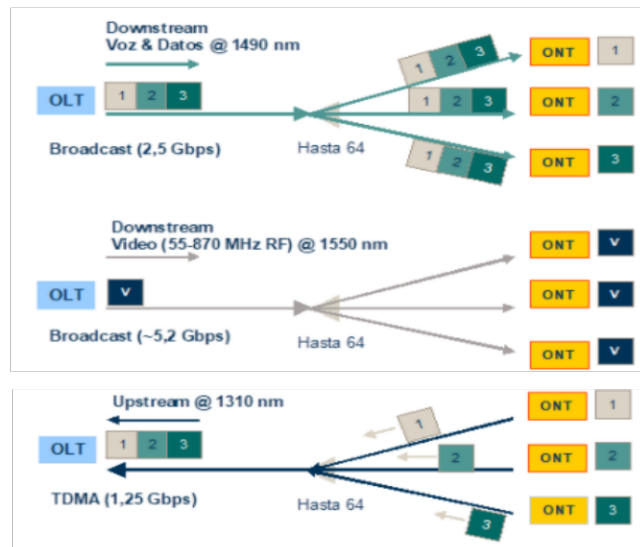


Figura 1.3. Funcionamiento de GPON [6].

Las redes GPON son capaces de soportar tres diferentes clases de ODN: la primera, denominada como clase A, admite pérdidas desde 5dB hasta 20dB, la segunda, clase B admite pérdidas desde 10dB hasta 25dB y, por último, la clase C admite pérdidas desde 15dB hasta 30dB [11].

Por lo tanto, la clase C permite a GPON, soportar un nivel máximo de *splitting* de 1:64, es decir, se provee del servicio hasta un límite de 64 usuarios por medio de un solo hilo de fibra óptica conectado a cada puerto de salida del *splitter*. También, GPON es capaz de alcanzar distancias de transmisión desde 10km hasta 20km.

Otra de las principales características de GPON es el uso de GEM (*GPON Encapsulation Method*), método utilizado para el encapsulamiento de la información (ver figura 1.4). Este método, a su vez proporciona a las redes GPON la capacidad de soportar diversas clases de servicio como: Ethernet, ATM, TDM, POTS (*Plain Old Telephone Service*), etc.

⁶ TDMA, es una técnica de acceso múltiple en la que a cada usuario se le asigna un slot de tiempo único mediante el cual pueda acceder al canal.

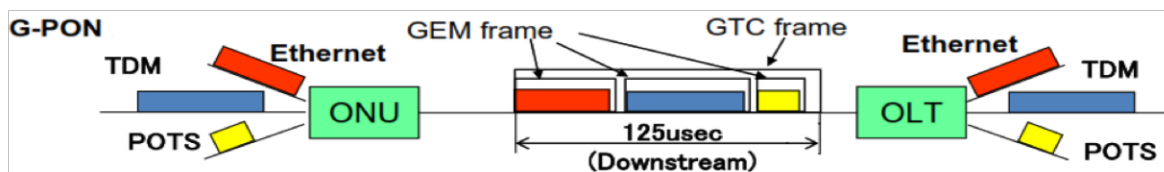


Figura 1.4. Transmisión de tráfico en GPON [13].

Tal como se aprecia en la figura 1.4 en sentido *downstream* el tráfico en GPON es encapsulado por tramas GEM de tamaño variable, las cuales a su vez constituyen el *payload* de la trama GTC (*GPON Transmission Convergence*), cuya transmisión se realiza de forma sincrónica cada 125µs. De igual manera, en sentido *upstream* la duración de la trama GTC es de 125µs, sin embargo, su estructura es diferente [13].

Además, para garantizar la seguridad de la información, GPON utiliza un método de encriptación llamado AES (*Advanced Encryption Standard*), el cual garantiza seguridad a las comunicaciones y se lleva a cabo únicamente en el canal de *uplink* [11].

Con respecto a la codificación de línea, GPON emplea el código binario NRZ (*Non Return Zero*), cuyo funcionamiento se basa en la asignación de un nivel de emisión de luz alto si el dato es un 1L, sin embargo, si el dato es un 0L se asigna un nivel de emisión de luz bajo [14].

1.4.2.3.2 Redes GEPON

El grupo EFM (*Ethernet First Mile*) desarrolló un estudio sobre la tecnología EPON, el cual fue aprobado en el año 2004 por el IEEE bajo el estándar 802.3ah. Las redes GEPON tal como se observa en la figura 1.5 se basan fundamentalmente en la transmisión asincrónica de tráfico Ethernet, por lo tanto, no se necesita de métodos de encapsulación ni protocolos de conversión para enlazarse con redes Ethernet como las LAN (*Local Area Network*). Además, GEPON a diferencia de las redes GPON ofrece velocidades de transmisión únicamente simétricas de 1.25Gbps [15].

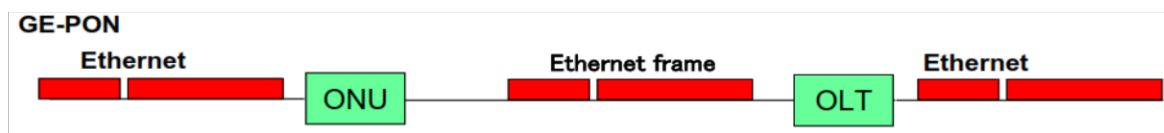


Figura 1.5. Transmisión de tráfico en GEPON [13].

Las redes GEPON en comparación con las redes GPON, solamente pueden soportar las dos primeras clases de ODN descritas anteriormente, es decir, clase A y clase B. Por ende, las redes GEPON poseen un nivel de *splitting* máximo de 1:32, dicho de otra manera, este tipo de redes ofrece el servicio hasta un límite de 32 usuarios por medio de un solo hilo de

fibra óptica conectado al correspondiente puerto de salida del *splitter*. De igual manera a GPON, GEPON cuenta con un rango de cobertura desde 10Km hasta 20km [11].

Las longitudes de onda asignadas para el funcionamiento de las redes GEPON, es similar al de GPON, ya que se emplean las longitudes de onda de 1490nm y 1310nm para *downlink* y *uplink* respectivamente, por consiguiente, estas tecnologías de acceso no pueden operar conjuntamente en una misma red PON.

Con respecto a la seguridad, en el estándar IEEE 802.3ah no se especifica ningún método de encriptación, sin embargo, para codificar la información los proveedores utilizan el algoritmo AES que a diferencia de GPON, en GEPON se usa tanto en sentido de *downstream* como de *upstream* [11].

Además, las redes GEPON, para su codificación de línea emplean los códigos de la clase mBnB (*mBinary / nBinary*), los cuales permiten “codificar m bits de datos de entrada en grupos de n bits de salida” [14]. También, es importante mencionar que en este tipo de códigos el valor de n siempre es mayor al valor de m. Específicamente GEPON utiliza el código de línea 8B/10B.

A continuación, en la tabla 1.2. se resumen y comparan las principales características de las redes GPON y GEPON mencionadas anteriormente.

Tabla 1.2. Principales características de las redes GPON y GEPON [11].

Características	GPON	GEPON
Estándar	Serie ITU-T G984.x	IEEE 802.3ah
Tipo de fibra	Fibras monomodo G.652.D y G.657.A	
λ Downlink [nm]	1490 (voz y datos) 1550 (video RF)	1490
λ Uplink [nm]	1310	1310
Velocidad de transmisión en downstream [Gbps]	2.5	1.25
Velocidad de transmisión en upstream [Gbps]	1.25	1.25
Clases de ODN	A (5dB-20dB) B (10dB-25dB) C (15dB-30dB)	A (5dB-20dB) B (10dB-24dB)
Cobertura [Km]	10 - 20	10 - 20
Máxima relación de división de los splitter	1:64	1:32
Codificación de línea	NRZ	8B/10B
Sincronización	Sincrónico (125 μ s)	Asincrónico
Técnica de acceso	TDMA	TDMA
Seguridad	AES	No se define

2. METODOLOGÍA

El presente trabajo de integración curricular está desarrollado en base al método analítico, ya que se estudia y analiza de forma detallada las características principales de la subcapa PMD de las tecnologías de nueva generación 50G-EPON y NG-PON2. Asimismo, este trabajo es del tipo descriptivo y confrontativo, debido a que se indican los requerimientos y particularidades de la subcapa PMD de las tecnologías de acceso antes mencionadas, para posteriormente realizar el respectivo análisis técnico comparativo de las mismas.

Además, se emplea la técnica del análisis documental, ya que la información recopilada, procesada y utilizada en este trabajo, se deriva de *papers*, revistas tecnológicas y sobre todo de los estándares IEEE 802.3ca (50G-EPON) e ITU G.989.x (NG-PON2). De igual manera, el enfoque de este trabajo es cualitativo, debido a que la información que se recolecta son características de la subcapa PMD y no datos numéricos que se puedan cuantificar.

Por último, como técnica de análisis de la información se utiliza la elaboración de tablas de resumen, las cuales tienen como finalidad comparar y resumir las características de la subcapa PMD de las tecnologías de acceso 50G-EPON y NG-PON2.

2.1 REDES DE ACCESO 50G-EPON

Las redes 50G-EPON están definidas en el estándar IEEE 802.3ca, el cual fue desarrollado por el grupo de EFM y aprobado por el IEEE en junio de 2020. Este tipo de redes opera sobre una topología punto a multipunto (P2MP, *Point-to-Multi-Point*), también llamada topología de árbol. En relación con dicha topología se puede describir dos dispositivos ópticos empleados: el primero conectado al tronco del árbol conocido como terminal de línea óptica (OLT) y el segundo conectado a las hojas del árbol denominado como unidades de red óptica (ONU), tal como se indicó en la figura 1.1.

Generalmente, la OLT se encuentra en las instalaciones del proveedor de servicios, por su parte las diversas ONU se localizan en las instalaciones de los usuarios. Además, la dirección de transmisión desde la OLT hasta las diferentes ONU se conoce como *downlink*, mientras que la dirección de transmisión desde las distintas ONU hasta la OLT se denomina como *uplink*.

50G-EPON es una arquitectura EPON que admite tres diferentes configuraciones con respecto a las velocidades de transmisión: la primera y la segunda configuración proveen

velocidades asimétricas, ya que, se tiene una tasa de 50Gbps en sentido descendente y tasas de 10Gbps o 25Gbps en sentido ascendente. La última configuración ofrece una velocidad simétrica, debido a que, la tasa de transmisión tanto en sentido ascendente como descendente es de 50Gbps.

Para lograr velocidades asimétricas este tipo de redes multiplexa dos longitudes de onda en sentido descendente y una en sentido ascendente, por su parte, para obtener la velocidad simétrica de 50Gbps se multiplexan dos longitudes de onda en ambos sentidos (*downlink* y *uplink*) [16].

2.1.1 ARQUITECTURA DE 50G-EPON

El estándar IEEE 802.3ca en relación con el modelo de referencia OSI trabaja solamente en las dos primeras capas, es decir la capa física y la capa de enlace de datos [16]. A su vez, cada una de estas capas se subdivide en subcapas e interfaces, tal como se observa en la figura 2.1.

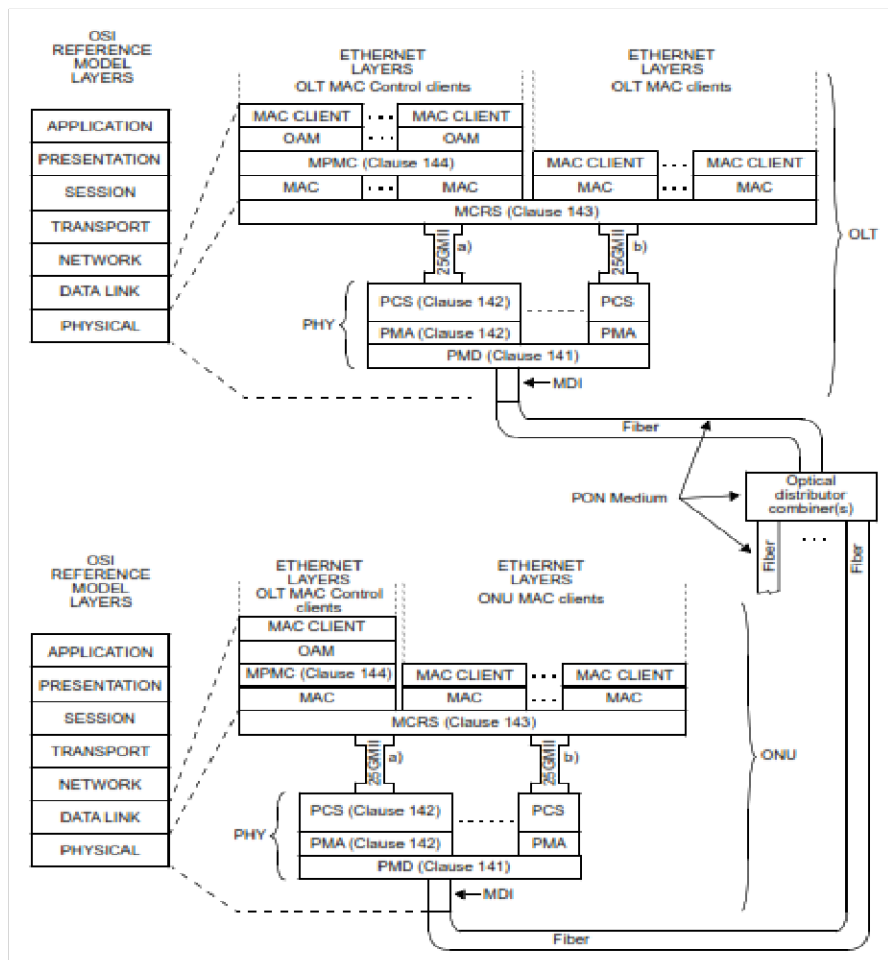


Figura 2.1. Comparación entre la arquitectura de 50G-EPON y el modelo de referencia OSI [16].

2.1.1.1 Capa física de 50G-EPON

La capa física se subdivide en las subcapas e interfaces descritas a continuación [16]:

- Interfaz MDI (*Medium Dependent Interface*): Es la interfaz encargada de enlazar la subcapa PMD con el cableado de fibra óptica, es decir, transportar la señal en ambas direcciones. Uno de los ejemplos más conocidos de esta interfaz es el *pigtail* de fibra.
- Subcapa PMD (*Physical Medium Dependent*): Esta subcapa es la responsable de la transmisión y recepción de datos entre la interfaz de servicio PMD y la interfaz MDI (ver Anexo II). Sus características y requerimientos generales se detallan en la sección 2.1.2.
- Subcapa PMA (*Physical Medium Attachment*): Esta subcapa se encuentra ubicada entre las subcapas PMD y PCS, por ende, su función principal es la de adaptar dichas subcapas, mediante interfaces de servicio. Además, en esta subcapa se introduce el término de tiempo de bloqueo de recuperación de reloj y datos (TCDR, *Lock Time Clock and Data Recovery*)⁷. De igual manera, la subcapa PMA cumple con las funciones de recuperación del reloj y alineamiento de fase.
- Subcapa PCS (*Physical Coding Sublayer*): Esta subcapa al igual que la subcapa PMA son descritas en la cláusula 142 del estándar IEEE 802.3ca. La subcapa PCS es la responsable de admitir las rutas de transmisión y recepción de datos de las diferentes PMD. Además, para garantizar el correcto flujo de los datos, esta subcapa incluye mecanismos como: la codificación/decodificación, el *interleaver*, etc. También, la subcapa PCS especifica una técnica de corrección de errores hacia adelante denominada QC-LDPC (*Quasi Cyclic-Low Density Parity Check*)⁸, la cual, permite incrementar el presupuesto del enlace óptico y el alcance de la fibra.
- Interfaces xMII (*Media Independent Interfaces*): Las interfaces xMII pueden ser de dos tipos según la velocidad que soporten. Por ejemplo: la interfaz que admite una operación de 10Gbps se denomina XGMII, por su parte, la interfaz que soporta una operación de 25Gbps se la conoce como 25GMII.

⁷ TCDR, es un intervalo de tiempo solicitado por el receptor con el objetivo de lograr el bloqueo de fase en el stream de datos entrante. Un PMA instanciado en una OLT se sincronizará a nivel de bit dentro de un TCDR con valor de 400ns.

⁸ QC-LDPC, es un código de corrección de errores hacia adelante (FEC) definido por un arreglo de matrices circulantes. En comparación a otros códigos, ofrecen las mejores prestaciones y menor complejidad al momento de su implementación, por tal motivo, son utilizados en varios estándares de telecomunicaciones.

- Subcapa MCRS (*Multi-Channel Reconciliation Sublayer*): Esta subcapa descrita en la cláusula 143 del estándar IEEE 802.3ca, es la responsable de la interacción entre la subcapa MAC y las múltiples interfaces xMII. Además, en esta subcapa se genera un enlace lógico, en el cual se etiqueta cada trama con un valor único llamado identificador de enlace lógico (LLID). También, en la subcapa MCRS se introduce el término de canal MCRS, definido como una ruta de transmisión o recepción de datos unidireccional.

2.1.1.2 Capa de enlace de datos de 50G-EPON

La capa de enlace de datos se subdivide en las subcapas que se describen a continuación [16]:

- Subcapa MAC (*Media Access Control*): Esta subcapa es la responsable de controlar las funciones para el acceso al medio de transmisión.
- Subcapa MPMC (*Multi-Point MAC Control*): Esta subcapa definida en la cláusula 144 del estándar IEEE 802.3ca, especifica funciones como: la asignación de recursos en la transmisión de datos, el descubrimiento y registro de dispositivos, de igual manera, se encarga de notificar de posibles congestiones a las capas superiores, facilitando de esta forma los esquemas de asignación dinámica de ancho de banda⁹ y la multiplexación estadística¹⁰ a través de la red. Además, la subcapa MPMC incorpora dos protocolos de control. El primer protocolo es el MPCP (*Multi-Point Control Protocol*), responsable del control del acceso, basado en TDM al medio P2MP. El segundo protocolo es el CCP (*Channel Control Protocol*), encargado de la consulta y control de los diversos canales dentro de la red.
- Subcapa OAM (*Operations, Administration & Maintenance*): Esta subcapa define mecanismos de operación, administración y mantenimiento, que permiten a los operadores de red monitorear constantemente el estado de la red y determinar rápidamente la ubicación de enlaces defectuosos o condiciones de falla para su correspondiente resolución.

⁹ DBA (*Dynamic Bandwidth Allocation*), es un método empleado por la OLT para asignar el ancho de banda a las diferentes ONU en base a la cantidad y tipos de tareas que se estén ejecutando en ese instante, es decir, se asigna el ancho de banda de forma dinámica bajo demanda.

¹⁰ *Multiplexación Estadística*, es una técnica de multiplexación similar a TDM, sin embargo, en esta técnica la asignación de los slots de tiempo se realiza en función de la prioridad o demanda y solamente a los canales que tienen datos para transmitir.

2.1.2 SUBCAPA PMD DE 50G-EPON

La cláusula 141 del estándar IEEE 802.3ac describe la subcapa PMD para las redes ópticas pasivas Ethernet Nx25G (Nx25G-EPON)¹¹. En este trabajo, de acuerdo, al alcance establecido, se analizarán las características de la PMD de 50G-EPON.

2.1.2.1 Clases de PMD de 50G-EPON

Existen tres diferentes tipos de PMD para 50G-EPON, las cuales se clasifican de acuerdo a la velocidad de transmisión y recepción a la que operan, a su vez estas clases se pueden subdividir en distintas subcategorías, en base a otros parámetros como: el nivel de potencia, tipo de coexistencia o dirección de la transmisión [16]. A continuación, se describen estos parámetros.

2.1.2.1.1 Velocidades de transmisión de 50G-EPON

Las PMD de 50G-EPON definen tres diferentes configuraciones con respecto a las velocidades de transmisión y recepción: 50/10Gbps, 50/25Gbps y 50/50Gbps (*downlink/uplink* respectivamente).

2.1.2.1.2 Clases de ODN de 50G-EPON

Las PMD de 50G-EPON admiten dos clases de ODN. La primera, la clase de potencia media, la cual soporta una pérdida de inserción de canal¹² máxima de 24dB y se denota con el número '2'. La segunda clase es la de potencia alta, la cual admite una pérdida de inserción de canal máxima de 29dB y se la representa con el número '3'. Por lo tanto, 50G-EPON con estas clases de potencia puede funcionar perfectamente en distancias de al menos 20km y con una relación de división de los *splitter* de al menos 1:32.

2.1.2.1.3 Dirección de transmisión de 50G-EPON

Las PMD de 50G-EPON operan tanto en sentido descendente como ascendente. Por consiguiente, las PMD en sentido de *downlink* son llamadas como PMD de OLT y se indican con la letra 'D', mientras que las PMD en sentido de *uplink* son conocidas como PMD de ONU y se denotan con la letra 'U'.

¹¹ Nx25G-EPON, es una arquitectura EPON que opera a diferentes velocidades de *uplink* y *downlink*. Este término es empleado para referirse conjuntamente a las arquitecturas 25/10G-EPON, 25/25G-EPON, 50/10G-EPON, 50/25G-EPON y 50/50G-EPON.

¹² *Pérdidas de inserción de canal*, Son aquellas pérdidas ocasionadas por los conectores, fusiones y otros elementos pasivos como los *splitter* y la propia fibra óptica. Sus valores expresan la máxima o mínima atenuación que puede admitir el enlace óptico, es decir, la ODN a la longitud de onda de trabajo.

2.1.2.1.4 Tipo de coexistencia con 50G-EPON

Las PMD de 50G-EPON al emplear como técnica de transmisión WDM pueden coexistir con tecnologías de redes de acceso como GPON o 10G-EPON. Las PMD que coexisten con GPON se denotan con la letra 'G', mientras que las PMD que coexisten con 10G-EPON se indican con la letra 'X'.

2.1.2.1.5 Código de línea de 50G-EPON

Las PMD de 50G-EPON utilizan la letra 'Q' para indicar que el código de línea empleado es 256B/257B, el cual se define como un código del tipo mBnB, que permite codificar 256 bits de datos en conjuntos de 257 bits de salida.

Las diferentes PMD de 50G-EPON descritas anteriormente cumplen con la siguiente estructura semántica: 'r1/r2GBASE-PQc-db'. Estos parámetros se resumen en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Parámetros de las PMD de 50G-EPON [16].

Parámetros	Descripción	Valores permitidos
r1	Tasa de datos en sentido descendente	50
r2	Tasa de datos en sentido ascendente	10, 25 y 50
G	Operación con tasas a nivel de Gbps	-
P	Operación en topologías P2MP	-
Q	Código de línea 256B/257B	-
c	Clase de coexistencia	G y X
d	Clase de dirección de transmisión	D y U
b	Clase de potencia	2 y 3

2.1.2.2 Plan de longitud de onda de 50G-EPON

Las redes 50G-EPON operan en la banda O, es decir, en la segunda ventana. El estándar IEEE 802.3ca define cinco longitudes de onda, dos de ellas se emplean en el sentido descendente y tres son utilizadas en sentido ascendente [16]. A continuación, en la tabla 2.2 se detalla la asignación de las longitudes de onda de operación para 50G-EPON.

Tabla 2.2. Longitudes de onda de operación de 50G-EPON [16].

Sentido de la transmisión	Notación λ	λ central [nm]	Rango λ [nm]
Downlink	DW0	1358	1356 - 1360
	DW1	1342	1340 - 1344
Uplink	UW0	1270	1260 - 1280
	UW1	1300	1290 - 1310
	UW2	1320	1318 - 1322

En la figura 2.2 se indica de forma gráfica la asignación de longitudes de onda de operación para 50G-EPON.

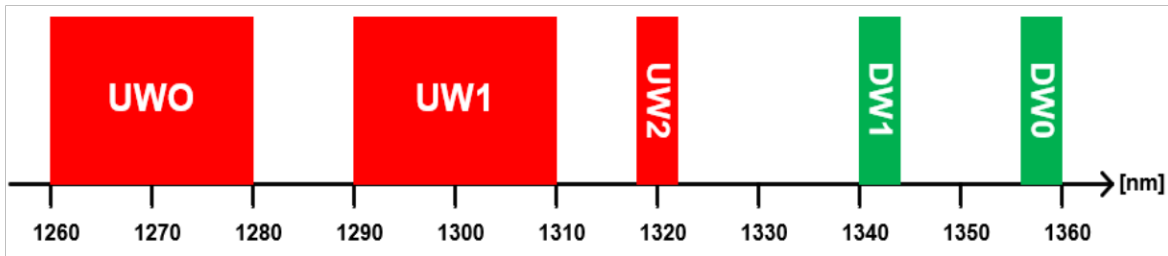


Figura 2.2. Longitudes de onda de operación de 50G-EPON [2].

2.1.2.3 Combinaciones permitidas (PMD OLT y PMD ONU) de 50G-EPON

El presupuesto de potencia de un enlace óptico está determinado por la potencia de lanzamiento del transmisor y la sensibilidad del receptor, es decir, depende de las combinaciones de PMD de tipo D y U, ya que se encuentran ubicadas en los extremos del medio físico.

En la tabla 2.3 se presenta un listado de las combinaciones de PMD que permiten conseguir los presupuestos de potencia definidos en el estándar IEEE 802.3ca.

Tabla 2.3. Compatibilidad entre las PMD de tipo D y U [16].

Downlink/Uplink [Gbps]	λ Downlink [nm]	λ Uplink [nm]	PMD OLT (D)	PMD ONU (U)
50/10	DW0 + DW1	UW0	50/10GBASE-PQG-D2 50/10GBASE-PQG-D3	50/10GBASE-PQG-U2 50/10GBASE-PQG-U3
	DW0 + DW1	UW1	50/10GBASE-PQX-D2 50/10GBASE-PQX-D3	50/10GBASE-PQX-U2 50/10GBASE-PQX-U3
50/25	DW0 + DW1	UW0	50/25GBASE-PQG-D2 50/25GBASE-PQG-D3	50/25GBASE-PQG-U2 50/25GBASE-PQG-U3
	DW0 + DW1	UW1	50/25GBASE-PQX-D2 50/25GBASE-PQX-D3	50/25GBASE-PQX-U2 50/25GBASE-PQX-U3
50/50	DW0 + DW1	UW0 + UW1	50GBASE-PQG-D2 50GBASE-PQG-D3	50GBASE-PQG-U2 50GBASE-PQG-U3
	DW0 + DW1	UW1 + UW2	50GBASE-PQX-D2 50GBASE-PQX-D3	50GBASE-PQX-U2 50GBASE-PQX-U3

2.1.2.4 Tipos de enlaces físicos de 50G-EPON

Las combinaciones posibles de las PMD tipo D y U mencionadas en la tabla 2.3, permiten determinar las características de los tipos de enlace para 50G-EPON, los cuales se resumen en las tablas 2.4, 2.5 y 2.6.

Tabla 2.4. Características del enlace asimétrico 50/10G-EPON [16].

CARACTERÍSTICAS	TIPO DE ENLACE			
	50/10-PQ20G	50/10-PQ20X	50/10-PQ30G	50/10-PQ30X
Tipo de fibra	Fibras monomodo G.652.D y G.657.A			
Tasa nominal en downlink [Gbps]	25			
Tasa nominal en uplink [Gbps]	10			
λ en downlink [nm]	1358 \pm 2 1342 \pm 2			
λ en uplink [nm]	1270 \pm 10	1300 \pm 10	1270 \pm 10	1300 \pm 10
Alcance [Km]	\geq 20			
Código de línea	256B / 257B			
Relación de división de los splitter	\geq 1:32			
Max. Pérdidas de inserción en la ODN [dB]	24		29	
Min. Pérdidas de inserción en la ODN [dB]	10		15	
Coexistencia con	GPON	10G-EPON	GPON	10G-EPON

Tabla 2.5. Características del enlace asimétrico 50/25G-EPON [16].

CARACTERÍSTICAS	TIPO DE ENLACE			
	50/25-PQ20G	50/25-PQ20X	50/25-PQ30G	50/25-PQ30X
Tipo de fibra	Fibras monomodo G.652.D y G.657.A			
Tasa nominal en downlink [Gbps]	25			
Tasa nominal en uplink [Gbps]	25			
λ Downlink [nm]	1358 \pm 2 1342 \pm 2			
λ Uplink [nm]	1270 \pm 10	1300 \pm 10	1270 \pm 10	1300 \pm 10
Alcance [Km]	\geq 20			
Codificación de línea	256B / 257B			
Relación de división de los splitter	\geq 1:32			
Max. Pérdidas de inserción en la ODN [dB]	24		29	
Min. Pérdidas de inserción en la ODN [dB]	10		15	
Coexistencia con	GPON	10G-EPON	GPON	10G-EPON

Tabla 2.6. Características del enlace simétrico 50/50G-EPON [16].

CARACTERÍSTICAS	TIPO DE ENLACE			
	50/50-PQ20	50/50-PQ20X	50/50-PQ30	50/50-PQ30X
Tipo de fibra	Fibras monomodo G.652.D y G.657.A			
Tasa nominal en downlink [Gbps]	25			
Tasa nominal en uplink [Gbps]	25			
λ Downlink [nm]	1358 \pm 2 1342 \pm 2			
λ Uplink [nm]	1270 \pm 10 1300 \pm 10	1300 \pm 10 1320 \pm 2	1270 \pm 10 1300 \pm 10	1300 \pm 10 1320 \pm 2
Alcance [Km]	\geq 20			
Codificación de línea	256B / 257B			
Relación de división de los splitter	\geq 1:32			
Max. Pérdidas de inserción en la ODN [dB]	24		29	
Min. Pérdidas de inserción en la ODN [dB]	10		15	
Coexistencia con	N/A	10G-EPON	N/A	10G-EPON

2.1.2.5 Puntos de referencia de la subcapa PMD de 50G-EPON

En la subcapa PMD de 50G-EPON definida en [16], se detallan los puntos de referencia que se muestran en la figura 2.3.

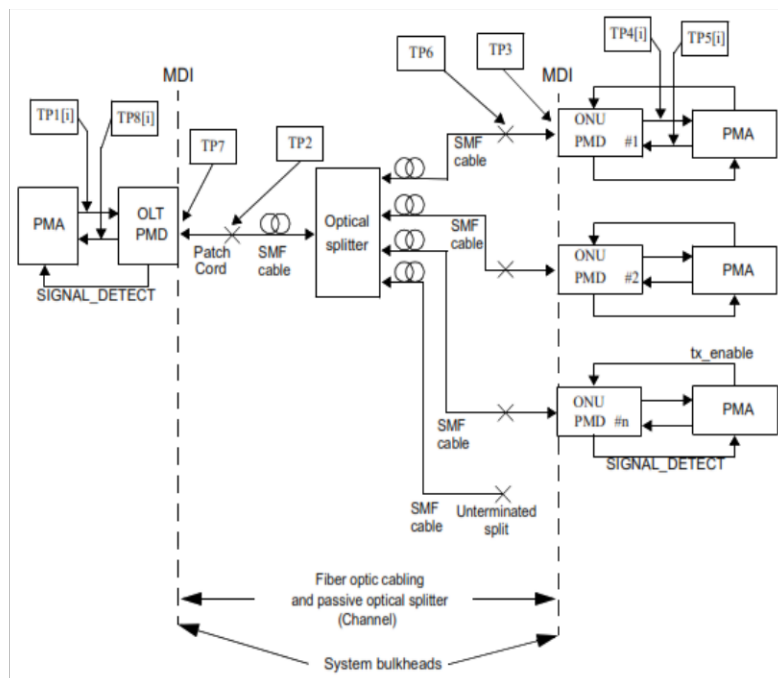


Figura 2.3. Puntos de referencia de la subcapa PMD de 50G-EPON [16].

A continuación, se describen las características más importantes de estos puntos de referencia.

- Los TP1, TP2, TP3 y TP4 son puntos de prueba para el canal descendente, mientras que los TP5, TP6, TP7 y TP8 son puntos de prueba para el canal ascendente.
- Los puntos TP1 y TP4 del canal descendente y los puntos TP5 y TP8 del canal ascendente definen las especificaciones eléctricas de la interfaz de servicio PMD.
- Los TP2 y TP3 son puntos de cumplimiento¹³ para *downlink*, por su parte los TP6 y TP7 son puntos de cumplimiento para *uplink*.
- La señal de transmisión óptica está definida en los terminales de un *patchcord*, es decir, en el TP2 para el canal descendente y en el TP6 para el canal ascendente. Además, en estos puntos se realizan las mediciones y pruebas del elemento transmisor.
- La señal de recepción óptica está definida en los extremos del cableado de fibra óptica, es decir, en el TP3 para el canal descendente y en el TP7 para el canal ascendente. De igual manera, en estos puntos se realizan las mediciones y pruebas del elemento receptor.

2.1.3 COEXISTENCIA DE 50G-EPON

Las tecnologías PON que se encuentran mayormente desplegadas e implementadas alrededor del mundo son GPON y GEAPON. Por lo tanto, tener la capacidad de coexistencia con dichas tecnologías es de gran utilidad, ya que se puede reutilizar la infraestructura existente con el objetivo de incrementar la capacidad de la red migrando a tecnologías PON de nueva generación y evitar de esta manera la completa eliminación de la tecnología PON heredada [17].

Además, uno de los beneficios de la coexistencia es la reducción del tiempo y los altos costos que supondría implementar una tecnología PON de nueva generación desde cero. De igual manera, la coexistencia entre tecnologías PON permite a los proveedores aumentar la capacidad según la demanda de los usuarios o el crecimiento de la red.

¹³ *Puntos de cumplimiento*, son aquellos puntos dentro de la subcapa PMD en donde se realizan las mediciones y pruebas de las señales de transmisión y recepción que garantizan la calidad del enlace óptico.

2.1.3.1 Coexistencia entre 50G-EPON y tecnologías heredadas GPON o GEPON

Los sistemas de 50G-EPON que pueden coexistir con las tecnologías GPON y GEPON (1490nm en *downlink* y 1310nm en *uplink*) son aquellos que proveen velocidades asimétricas, es decir, 50/10G-EPON y 50/25G-EPON. Para el enlace simétrico de 50/50G-EPON la coexistencia con las tecnologías GPON y GEPON no es posible, ya que, para ofrecer 50Gbps en sentido ascendente, se necesita de la multiplexación de dos longitudes de onda: 1270nm y 1300nm o 1300nm y 1320nm, las cuales no pueden ser empleadas, debido a que dichas longitudes de onda son utilizadas para la operación de las tecnologías GPON y GEPON [16].

En las figuras 2.4 y 2.5 se muestran los escenarios de coexistencia entre estas tecnologías PON.

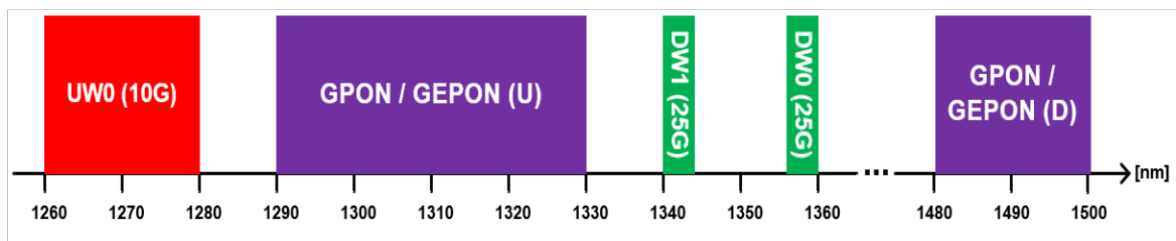


Figura 2.4. Coexistencia entre 50/10G-EPON y GPON o GEPON.

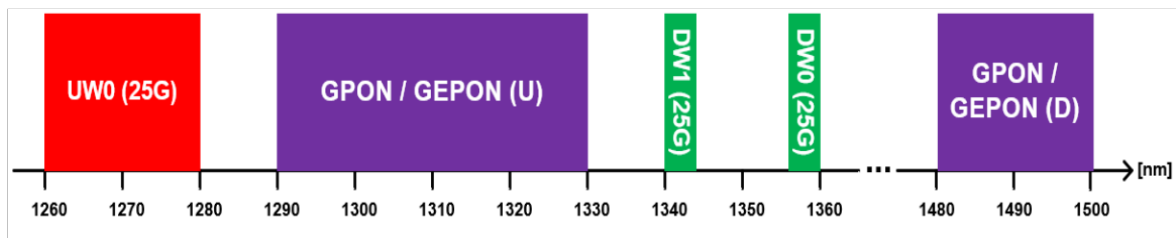


Figura 2.5. Coexistencia entre 50/25G-EPON y GPON o GEPON.

2.1.3.2 Coexistencia entre 50G-EPON y tecnologías heredadas 10G-EPON

La coexistencia entre 50G-EPON y la tecnología de acceso 10G-EPON, la cual opera con rangos de longitudes de onda que van desde 1260nm hasta 1280nm para *uplink* y desde 1575nm hasta 1580nm para *downlink*, aplica para todos los sistemas, es decir, 50/10G-EPON, 50/25G-EPON y 50/50G-EPON, ya que emplean rangos de longitud de onda diferentes a los que utiliza para su operación 10G-EPON.

Además, es importante mencionar que 10G-EPON, ofrece enlaces con velocidades tanto simétricas como asimétricas. La coexistencia entre estas tecnologías únicamente existe para el enlace simétrico 10/10G-EPON, debido a que, el enlace asimétrico 10/1G-EPON para su operación en *uplink* utiliza un rango de longitud de onda (1310nm \pm 50) similar al que emplean los sistemas de 50G-EPON, por tal motivo para evitar la superposición de dichos rangos de longitud de onda, la coexistencia entre 10/1G-EPON y 50G-EPON no es factible [18].

A continuación, en las figuras 2.6, 2.7 y 2.8 se muestran los escenarios de coexistencia entre estas tecnologías PON.

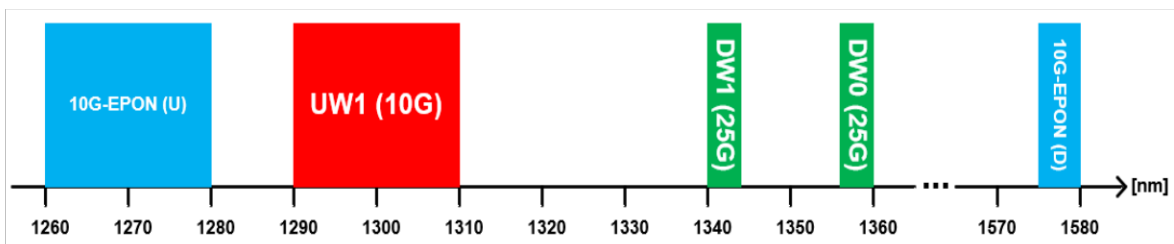


Figura 2.6. Coexistencia entre 50/10G-EPON y 10G-EPON (simétrico).

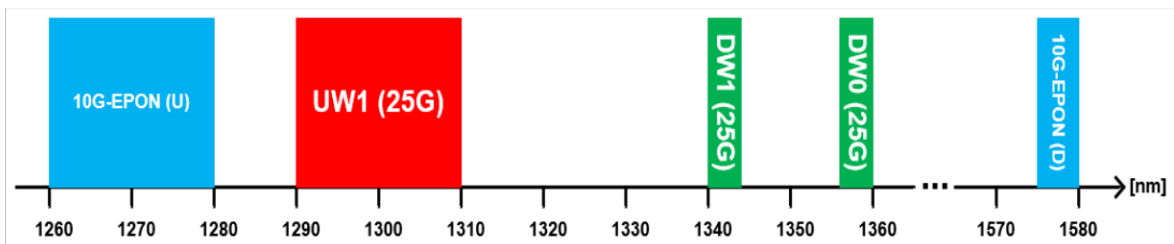


Figura 2.7. Coexistencia entre 50/25G-EPON y 10G-EPON (simétrico).

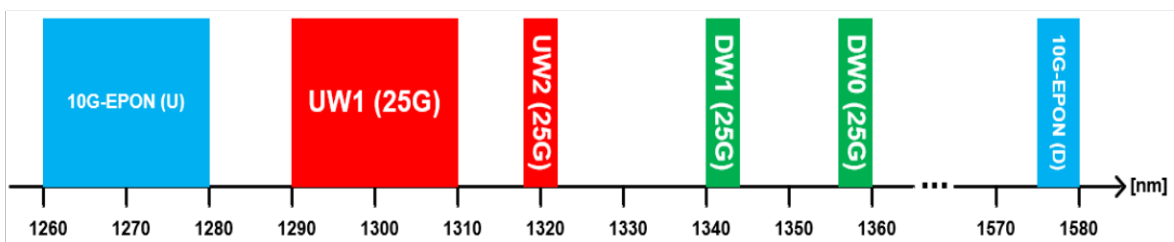


Figura 2.8. Coexistencia entre 50/50G-EPON y 10G-EPON (simétrico).

2.2 REDES DE ACCESO NG-PON2

Las redes de próxima generación NG-PON2 se encuentran estandarizadas en la serie ITU-T G.989.x, además, fueron desarrolladas por el grupo FSAN y aprobadas por la ITU. A continuación, en la tabla 2.7 se indican las recomendaciones que constituyen la serie antes mencionada.

Tabla 2.7. Recomendaciones de la serie ITU-T G989.x [5].

Recomendación	Fecha de aprobación (edición en vigencia)	Característica
ITU-T G989.1	Marzo de 2013	Requerimientos generales de NG-PON2
ITU-T G989.2	Febrero de 2019	Especificaciones de la subcapa PMD de NG-PON2
ITU-T G989.3	Mayo de 2021	Especificaciones de la subcapa TC de NG-PON2

De acuerdo al alcance de este trabajo de integración curricular, se describirán las características principales de las recomendaciones ITU-T G989.1 e ITU-T G989.2, es decir los requerimientos de NG-PON2 y especificaciones de su correspondiente subcapa PMD. Por ende, el estudio de la capa TC no se realizará, ya que está fuera del alcance propuesto para el presente trabajo.

NG-PON2 es un sistema PON que opera generalmente a una capacidad básica de 40Gbps en sentido descendente y 10Gbps en sentido ascendente, con alcances de al menos 40Km sin la necesidad de emplear extensores de alcance intermedios y hasta 60Km con el uso de extensores de alcance¹⁴. También, este tipo de red soporta un nivel de *splitting* máximo de 1:256 [19].

Además, las velocidades de transmisión que ofrece NG-PON2 se logran mediante la operación de diversas longitudes de onda. Dicha operación está fundamentada en dos técnicas novedosas como: TWDM (*Time and Wavelength Division Multiplexing*) y PtP WDM (*Point-to-Point Wavelength Division Multiplexing*), las cuales se describen en secciones posteriores.

Por medio de estas técnicas, NG-PON2, es capaz de proveer de servicio no solo a usuarios residenciales y comerciales, sino también satisfacer las nuevas demandas de servicio como el *fronthaul*¹⁵ y *backhaul*¹⁶ móvil de las redes celulares.

2.2.1 ARQUITECTURA DE NG-PON2

La arquitectura lógica para NG-PON2 de múltiples longitudes de onda se presenta a continuación en la figura 2.9.

¹⁴ *Extensores de alcance*, son elementos ópticos activos que se emplean en la ODN con el objetivo de incrementar la cobertura y el alcance nominal que proporciona cada tecnología PON. Se clasifican en dos tipos: amplificadores ópticos o regeneradores OEO (Optic-Electric-Optic).

¹⁵ *Fronthaul móvil*, son enlaces de fibra óptica, usados en una red móvil para interconectar las BBU (*Base Band Unit*) con sus respectivas RRH (*Remote Radio Head*).

¹⁶ *Backhaul móvil*, se define como la red de transporte que por medio de enlaces de fibra óptica permite la interconexión entre la red central (*Core Network*) y la RAN (*Radio Access Network*) de la red móvil.

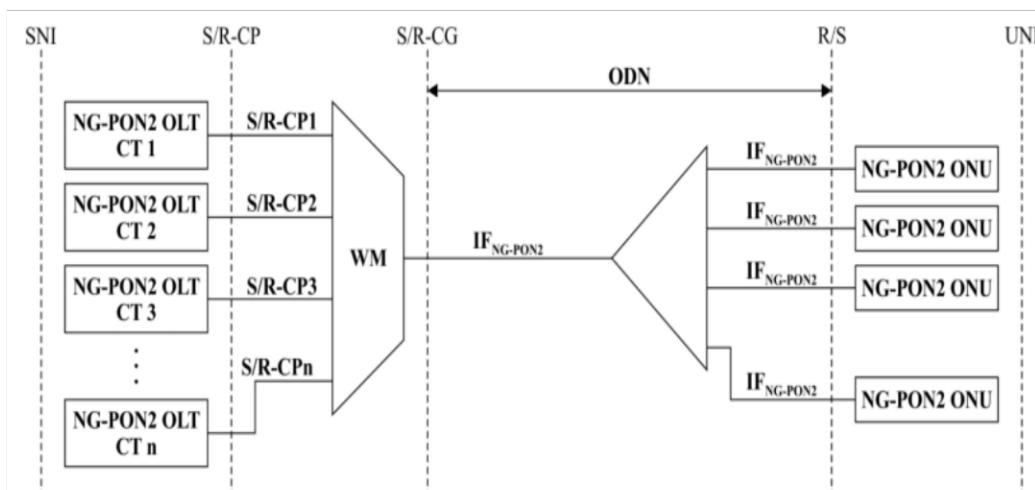


Figura 2.9. Arquitectura lógica de NG-PON2 [20].

Tal como se observa en la figura 2.9, la arquitectura lógica de NG-PON2 está segmentada por puntos de referencia, los cuales se describen a continuación:

- Interfaz SNI (*Service Node Interface*): Es la interfaz que proporciona el acceso al cliente a un nodo de servicio.
- S/R (Send/Receive): Es un punto de referencia donde la OLT envía (hacia las ONU) y recibe (desde las ONU) un par de longitudes de onda que representan el sentido descendente y ascendente de la transmisión. Además, existen dos diferentes tipos, tales como: S/R-CP (*S/R for Channel Pair*) y S/R-CG (*S/R for Channel Group*).
- R/S (Receive/Send): Es un punto de referencia donde las ONU reciben (desde la OLT) y envían (hacia la OLT) un par de longitudes de onda que representan la dirección descendente y ascendente de la transmisión.
- Interfaz UNI (*User Network Interface*): Es la interfaz que permite la interconexión entre la red de acceso y el cliente.

De igual manera, en la figura 2.9 se puede observar que la OLT está constituida por múltiples terminaciones de canal (CT, *Channel Termination*), las cuales se encuentran conectadas a un multiplexor de longitud de onda (WM, *Wavelength Multiplexer*), por medio de un par de canales (S/R-CP). A su vez, los puntos de referencia: S/R-CG ubicado a la salida del multiplexor y R/S situado a la entrada de las ONU, corresponden al tramo que comprende la red de distribución óptica de NG-PON2.

Además, en la ODN se encuentran las interfaces $IF_{NG-PON2}$, las cuales son responsables de admitir todos los protocolos necesarios que permiten la transmisión entre la OLT y las diferentes ONU o viceversa.

Las diversas ONU en NG-PON2 son denominadas *colourless*, ya que se encuentran equipadas con un transmisor y receptor sintonizables, los cuales tienen como objetivo ajustarse a los canales de longitud de onda TWDM o PtP WDM en sentido ascendente (transmisor) y descendente (receptor) asignados dentro de las bandas que se especifican en la tabla 2.11.

Además, la arquitectura de NG-PON2 se puede expandir para admitir diversas OLT en una misma ODN, con la finalidad de permitir flexibilidad espectral. Este enfoque es empleado por NG-PON2 para proporcionar varias características como: admitir diversos escenarios de implementación, realizar actualizaciones de manera gradual de la capacidad de la red en función del crecimiento en la demanda de los servicios, facilitar varios escenarios de coexistencia que eviten la interferencia con tecnologías PON heredadas y posteriormente permitir el uso de nuevas bandas de longitud de onda cuando las tecnologías heredadas caigan en desuso.

Para llevar a cabo estas características, NG-PON2 permite operar con múltiples longitudes de onda, que puedan dividirse física y lógicamente, además de gestionarse de manera independiente por una o varias OLT [19].

2.2.2 TECNOLOGÍAS DE NG-PON2

Las redes NG-PON2 son el primer sistema PON en el que se introducen dos novedosas tecnologías: la multiplexación por división de longitud de onda y tiempo (TWDM) y la multiplexación por división de tiempo punto a punto (PtP WDM).

A continuación, en la figura 2.10 se puede observar de manera más detallada la arquitectura de estas tecnologías.

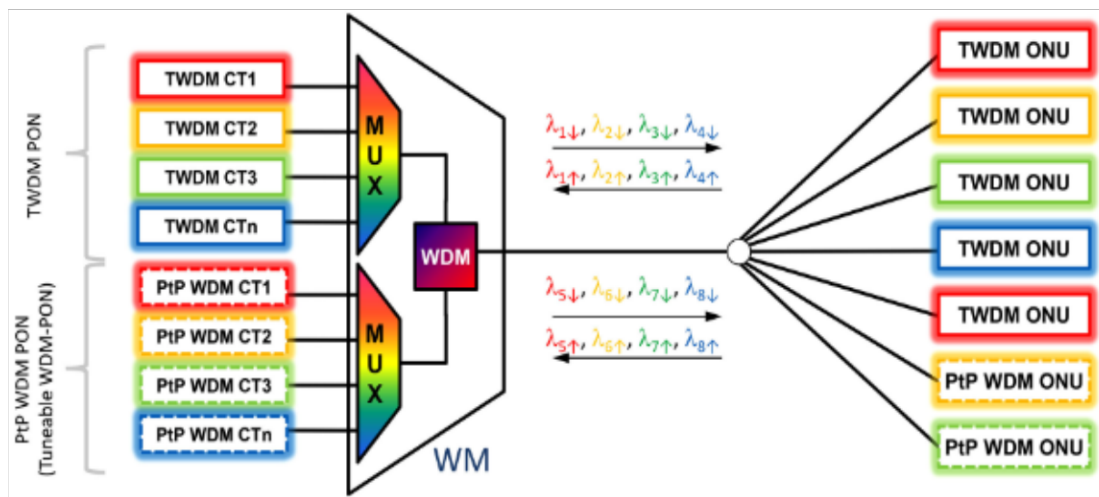


Figura 2.10. Arquitectura de TWDM y PtP WDM [4].

2.2.2.1 TWDM

La tecnología TWDM es un mecanismo híbrido, debido a que combina las funcionalidades de la multiplexación por división de tiempo (TDM) y la multiplexación por longitud de onda (WDM), con el propósito de compartir cada canal de longitud de onda entre las diversas ONU mediante el uso de TDM y mecanismos de acceso múltiple como TDMA [21].

También, TWDM es la tecnología más empleada para los despliegues e implementaciones de NG-PON2. Adicionalmente, TWDM utiliza mínimo cuatro y máximo ocho canales de longitudes de onda por fibra, cada uno de las cuales es capaz de entregar tasas de bits simétricas o asimétricas de 2.5Gbps o 10Gbps.

De igual manera, es importante mencionar que NG-PON2 cuando trabaja con TWDM emplea codificación de línea del tipo NRZ. Adicionalmente, tal como se observa en la figura 2.11, TWDM se utiliza para proveer servicios compartidos con despliegues de fibra hasta el hogar (FTTH, *Fiber To The Home*).

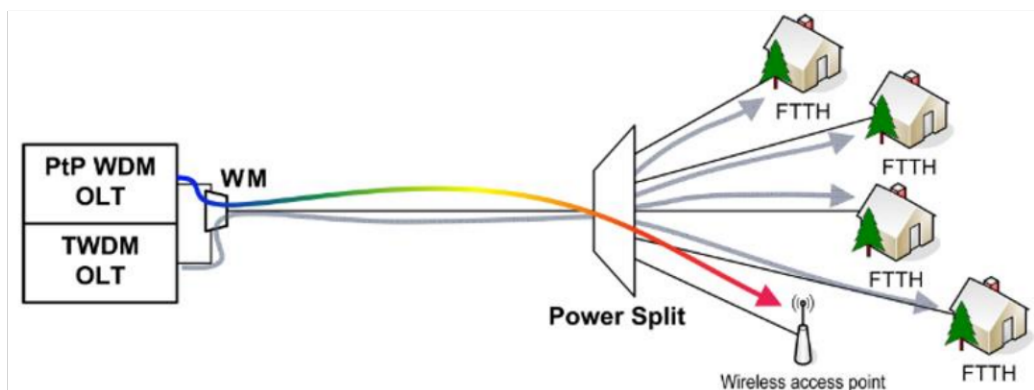


Figura 2.11. Servicios de TWDM y PtP WDM [4].

2.2.2.2 PtP WDM

Esta tecnología permite la conectividad punto a punto empleando un canal de longitud de onda dedicado por ONU tanto para el sentido descendente como ascendente. De manera similar a TWDM, PtP WDM soporta un mínimo de cuatro canales de longitud de onda, sin embargo, su límite máximo no se especifica, ya que puede operar en cualquiera de las bandas que no estén siendo utilizadas por TWDM o sistemas PON heredados. Un ejemplo de los servicios dedicados que proporciona PtP WDM son los puntos de acceso inalámbricos, tal como se indica en la figura 2.11.

En la arquitectura de PtP WDM que se indica en la figura 2.12, se introduce un nuevo término denominado como nodo de derivación (*branching node*), en el cual la ODN

distribuye los canales de longitud de onda para cada una de las ONU. También, el nodo de derivación puede admitir cualquier combinación entre uno o más niveles de *splitting* y filtros de longitud de onda muy selectivos como los AWG (*Arrayed Waveguide Gratings*), los cuales son empleados para agregar o separar los diferentes canales de longitud de onda que se transmiten a través de un enlace óptico [20].

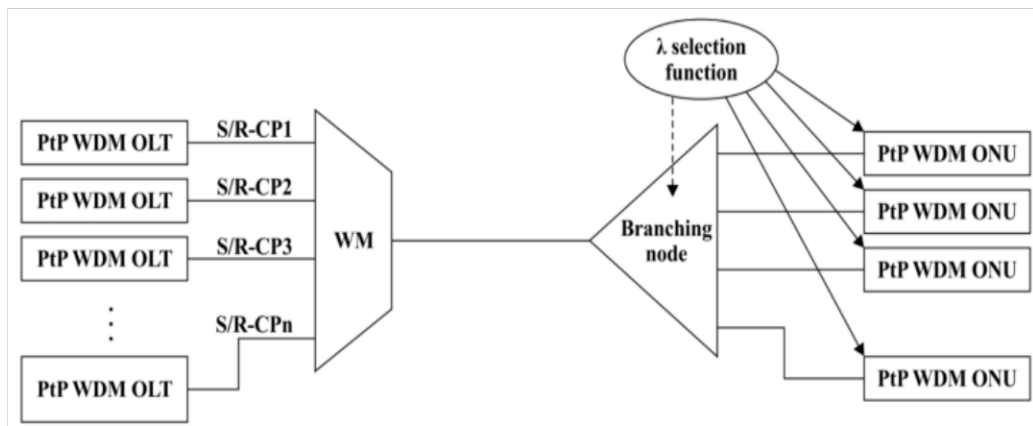


Figura 2.12. Arquitectura de PtP WDM [20].

Además, en PtP WDM según la ubicación del selector de longitud de onda se pueden originar dos clases de arquitectura [20]: La primera conocida como WS (*Wavelength Selected*), incorpora la función de selección de longitud de onda dentro de las ONU. La longitud de onda de las ONU está determinada en base a un proceso de activación que implica a la OLT. También, en la ODN de este tipo de arquitectura se utilizan los *splitter* ópticos.

La segunda clase de arquitectura es denominada como WR (*Wavelength Routed*), la cual sitúa su función de selección de longitud de onda en el nodo de derivación. Además, la longitud de onda de las ONU está definida por su conectividad física a la ODN, por ejemplo, por un puerto del AWG. Esta clase de arquitectura admite en su ODN filtrado de longitud de onda a través de filtros AWG. Además, en comparación a los *splitter*, estos dispositivos presentan menores pérdidas, por ende, con su utilización se pueden lograr mayores alcances de transmisión.

De igual manera, es importante mencionar que las arquitecturas WS y WR se pueden combinar, con el objetivo de lograr arquitecturas híbridas. Este tipo de arquitectura permite incrementar la relación de división de los *splitter* sobre la misma clase de ODN, ya que dicha ODN es capaz de soportar la operación simultánea tanto del *splitter* óptico como del filtro de longitud de onda AWG [3]. En la figura 2.13 se observa un esquema de este tipo de arquitectura.

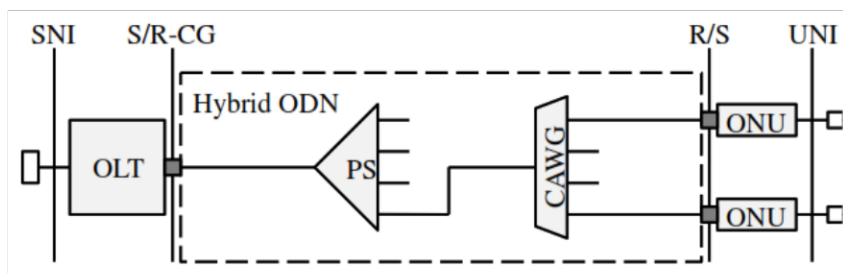


Figura 2.13. Arquitectura PtP WDM híbrida [3].

Tal como se observa en la figura 2.13, la ODN aparte del *splitter* óptico está constituida por un filtro de longitud de onda del tipo CAWG (*Cyclic Arrayed Waveguide Gratings*), el cual provee la capacidad de multiplexar y demultiplexar los canales de longitud de onda de manera cíclica.

2.2.3 SUBCAPA PMD DE NG-PON2

A continuación, en base a la recomendación ITU-T G989.2 se describen los requerimientos y características generales de la subcapa PMD para los sistemas PON que operan con las tecnologías TWDM y PtP WDM.

2.2.3.1 Clases de ODN de NG-PON2

Las redes NG-PON2 admiten cuatro clases de ODN: nominal 1, nominal 2, extendida 1 y extendida 2. Estas clases están categorizadas en base a valores predeterminados por la pérdida del trayecto óptico (OPL, *Optical Path Loss*) mínima y máxima [20]. La OPL para cada clase está especificada entre los puntos de referencia S/R-CG y R/S. Además, en NG-PON2 la diferencia entre los valores máximos y mínimos de OPL siempre es de 15dB.

En la tabla 2.8 se detallan las clases de ODN con sus respectivos valores de OPL.

Tabla 2.8. Clases de ODN de NG-PON2 [20].

Clases de ODN	Pérdidas de trayecto óptico		
	Valor Mínimo [dB]	Valor Máximo [dB]	Diferencia [dB]
Nominal 1 (N1)	14	29	15
Nominal 2 (N2)	16	31	
Extendida 1 (E1)	18	33	
Extendida 2 (E2)	20	35	

2.2.3.2 Velocidades de transmisión de NG-PON2

Las redes NG-PON2 que operan bajo una arquitectura TWDM, presentan tres opciones de velocidades de transmisión, las cuales proporcionan velocidades tanto simétricas como

asimétricas. Por su parte, cuando NG-PON2 opera con una arquitectura PtP WDM, de igual manera a TWDM, admite tres clases de tasas de transmisión, sin embargo, estas proveen únicamente velocidades simétricas. En la tabla 2.9 se describen las diferentes categorías de velocidades de transmisión con las cuales opera NG-PON2.

Tabla 2.9. Velocidades de transmisión para NG-PON2 [20].

Arquitectura	Categoría	Tasas de transmisión en downlink [Gbps]	Tasas de transmisión en uplink [Gbps]	Número de λ de operación
TWDM	Opción 1	10	2.5	4 \downarrow ↑ - 8 \downarrow ↑
	Opción 2	10	10	
	Opción 3	2.5	2.5	
PtP WDM	Clase 1	1.2288 - 1.2500	1.2288 - 1.2500	4 \downarrow ↑ - n \downarrow ↑
	Clase 2	2.4576 - 2.6660	2.4576 - 2.6660	
	Clase 3	6.1440 - 11.090	6.1440 - 11.090	

La velocidad de transmisión más empleada en NG-PON2 es la de 40Gbps en *downstream* y 10Gbps en *upstream*, es decir, la que proporciona la opción 1 cuando trabaja con una arquitectura TWDM de 4 longitudes de onda. De igual manera, con TWDM se pueden lograr tasas de transmisión máximas de hasta 80Gbps tanto en sentido descendente como ascendente cuando se opera con 8 longitudes de onda.

Por su parte, las tasas de transmisión simétricas que se proporciona cuando NG-PON2 trabaja con PtP WDM, están determinadas en función de los servicios que se ofrecen, por ejemplo: SDH (*Synchronous Digital Hierarchy*), Ethernet, CPRI (*Common Public Radio Interface*)¹⁷, SONET (*Synchronous Optical Network*), OTN (*Optical Transport Networking*), OBSAI (*Open Base Station Standard Initiative*)¹⁸, etc. [4], [20].

De igual manera, es importante mencionar que el código de línea a emplearse en PtP WDM dependerá de la aplicación, por ende, se pueden utilizar códigos del tipo NRZ, mBnB, Miller¹⁹, etc.

¹⁷ CPRI, es una interfaz propuesta por Ericsson, Huawei, Alcatel y Siemens para la interconexión de las BBU (*Base Band Unit*) con sus correspondientes RRH (Remote Radio Head) de las redes móviles. Además, en CPRI se definen diez opciones de velocidades de transmisión, las cuales varían desde 614.4Mbps (CPRI-1) hasta 24.3302Gbps (CPRI-10).

¹⁸ OBSAI, es una iniciativa planteada por Hyundai, Nokia, LG, ZTE y Samsung para la estandarización de la arquitectura de las estaciones base de las redes móviles, en la cual se definen interfaces que cumplen la misma función que la interfaz CPRI. Adicionalmente, en OBSAI se establecen cuatro tasas de transmisión, las cuales varían desde 768Mbps (OBSAI-1) hasta 6.144Gbps (OBSAI-4).

¹⁹ Código Miller, es un código de línea polar, que basa su funcionamiento en realizar una transición a la mitad del intervalo cuando exista un 1L, sin embargo, si existe un 0L no se produce ninguna transición a menos que el siguiente bit sea nuevamente un 0L, en este caso si se efectúa una transición, pero al final del primer intervalo.

A continuación, en la tabla 2.10 se detallan las velocidades de transmisión con los respectivos servicios que admiten.

Tabla 2.10. Servicios y velocidades de NG-PON2 cuando opera con PtP WDM [20].

Categoría	Tasas de transmisión [Gbps]	Servicios soportados
Clase 1	1.2288	CPRI-2 (Móvil)
	1.2441	STM-8 (SDH)
	1.2500	1G Ethernet
Clase 2	2.4576	CPRI-3 (Móvil)
	2.4883	STM-16 (SDH), OC-48 (SONET)
	2.6660	OTU-1 (OTN)
Clase 3	6.1440	CPRI-6 (Móvil), OBSAI-4 (Móvil)
	9.8304	CPRI-7 (Móvil)
	9.9532	STM-64 (SDH), OC-192 (SONET)
	10.1376	CPRI-8 (Móvil)
	10.3125	10G Ethernet
	10.709, 11.090	OTU-2 (OTN), OTU-2e (OTN)

2.2.3.3 Plan de longitud de onda de NG-PON2

El plan de longitud de onda para NG-PON2 fue desarrollado con dos propósitos: mantener la coexistencia con tecnologías PON heredadas (GPON, XG-PON) y garantizar la flexibilidad espectral para la adaptación a diversos escenarios de implementación y expansión futura [3].

En la tabla 2.11 se especifican las bandas de longitud de onda de operación de NG-PON2 para una arquitectura TWDM y PtP WDM.

Tabla 2.11. Bandas de longitudes de onda de operación de NG-PON2 [20].

Arquitectura	Sentido de la transmisión	Opción: Rango λ [nm]
TWDM	Downlink	1596 - 1603
	Uplink	Banda ancha: 1524 - 1544
		Banda reducida: 1528 - 1540
		Banda estrecha: 1532 - 1540
PtP WDM	Downlink / Uplink	Espectro expandido: 1524 - 1625
		Espectro compartido: 1603 - 1625

Del plan de longitud de onda descrito en la tabla 2.11 se pueden detallar las siguientes particularidades [3]:

- TWDM en sentido descendente opera en la banda L y sus longitudes de onda están asignadas para evitar interferencias con las señales de video RF (1550nm) y XG-PON (desde 1575nm hasta 1580nm para downlink) [3]. En la tabla 2.12 se indica el plan de frecuencias para esta tecnología. Generalmente, los primeros cuatro canales de longitud de onda son asignados a TWDM, los siguientes canales, del cinco hasta el ocho, se pueden asignar opcionalmente a TWDM o pueden ser empleados por PtP WDM siempre y cuando no se encuentren ocupados.
- TWDM en sentido ascendente trabaja en la banda C y presenta tres opciones espectrales: banda ancha, banda reducida y banda estrecha, las cuales están definidas en función de la capacidad de control de longitud de onda que presenta el transmisor de las diferentes ONU [3].
- PtP WDM para sentido descendente y ascendente presenta dos opciones espectrales: La primera opción se conoce como espectro compartido, la cual permite la coexistencia total con tecnologías PON heredadas y TWDM. La segunda opción es denominada como espectro expandido, la cual permite la flexibilidad espectral, además, esta opción permite utilizar cualquier banda de longitud de onda de las tecnologías PON heredadas o TWDM que no estén siendo ocupadas.
- La elección de la opción de espectro en PtP WDM, está determinada por los requisitos de coexistencia, ya que, el espectro expandido es usado en escenarios *greenfield*, en cambio el espectro compartido es empleado en escenarios *brownfield*. Estos escenarios se describen en la sección 2.2.4.1.
- PtP WDM a diferencia de TWDM permite que los canales de longitud de onda en sentido descendente y ascendente se ubiquen en la misma banda para lograr una mayor flexibilidad de implementación.

Tabla 2.12. Plan de frecuencias para TWDM [20].

Canal	Frecuencia central [THz]	λ [nm]
1	187.8	1596.34
2	187.7	1597.19
3	187.6	1598.04
4	187.5	1598.89
5	187.4	1599.75
6	187.3	1600.60
7	187.2	1601.46
8	187.1	1602.31

2.2.3.4 Tiempos de sintonización de las ONU en NG-PON2

Las diversas ONU en NG-PON2 están constituidas por un transmisor y un receptor sintonizables, los cuales son responsables de la selección del canal de longitud de onda más adecuado.

La principal característica de estos dispositivos sintonizables es su tiempo de sintonización, el cual está definido como el “tiempo transcurrido desde el momento en que el dispositivo sintonizable deja el canal de longitud de onda de origen hasta el instante en que el dispositivo sintonizable alcanza el canal de longitud de onda de destino” [21].

Además, estos dispositivos sintonizables son capaces de admitir tres diferentes clases de tiempo de sintonización, las cuales se especifican en la tabla 2.13.

Tabla 2.13. Clases de tiempo de sintonización [20].

Categoría	Tiempo de sintonización
Clase 1	< 10 μ s
Clase 2	10 μ s - 25 ms
Clase 3	25 ms - 1 s

Tal como se detalla en la tabla 2.13 los dispositivos sintonizables más rápidos son aquellos que pertenecen a la clase 1, ya que proporcionan tiempos de sintonización menores a 10 μ s. Además, con esta clase los dispositivos pueden habilitar funciones como la asignación dinámica de ancho de banda y longitud de onda [3].

Con respecto a los dispositivos de clase 2, estos ofrecen una sintonización un poco más lenta en comparación con los dispositivos de la clase 1. Sin embargo, estos dispositivos son capaces de habilitar características dinámicas como: la distribución de la carga y el ahorro de energía [3].

Por su parte, los dispositivos de clase 3 son aquellos que presentan los tiempos de sintonización más largos en comparación al resto, por ende, su utilización es adecuada en aplicaciones en donde se necesite de reajustes en la sintonización de la longitud de onda poco frecuentes [3].

2.2.3.5 Tipos de enlaces físicos de NG-PON2

En base a las características de la subcapa PMD de NG-PON2, detalladas en secciones anteriores, en la tabla 2.14 se pueden describir las posibles combinaciones y parámetros de los tipos de enlaces físicos, tanto para TWDM como para PtP WDM.

Tabla 2.14. Tipos de enlaces físicos para NG-PON2 [19], [20].

CARACTERÍSTICA	TECNOLOGÍAS	
	TWDM	PtP WDM
Tipo de fibra	Fibras monomodo G.652.D y G.657.A	
Tasa de transmisión en downlink/uplink [Gbps]	Opción 1: 10 / 2.5 Opción 2: 10 / 10 Opción 3: 2.5 / 2.5	Clase 1: 1.22 - 1.25 / 1.22 - 1.25 Clase 2: 2.45 - 2.66 / 2.45 - 2.66 Clase 3: 6.14 - 11.09 / 6.14 - 11.09
Número de λ de operación	4 \downarrow ↑ - 8 \downarrow ↑	4 \downarrow ↑ - n \downarrow ↑
Rango de λ en downlink [nm]	1596 - 1603	Espectro expandido: 1524 - 1625 Espectro compartido: 1603 - 1625
Rango de λ en uplink [nm]	Banda ancha: 1524 - 1544 Banda reducida: 1528 - 1540 Banda estrecha: 1532 - 1540	
Rango de pérdidas del trayecto óptico [dB]	N1: 14 - 29 N2: 16 - 31 E1: 18 - 33 E2: 20 - 35	
Alcance [Km]	40 sin extensores de alcance 60 con extensores de alcance	
Máxima relación de división de los splitter	1:256	
Código de línea	NRZ	Según la aplicación (NRZ, Miller, mBnB, etc.)
Parámetros adicionales de la interfaz óptica	Ver Anexo III	Ver Anexo IV

2.2.4 MIGRACIÓN Y COEXISTENCIA DE NG-PON2

La demanda de ancho de banda que necesitan para su funcionamiento los nuevos servicios de telecomunicaciones, como por ejemplo el *fronthaul* de las redes móviles, el cual requiere de aproximadamente 25Gbps para una CPRI-10 [22], no puede ser solventada por los sistemas PON heredados (GPON, XG-PON o GEPON), ya que ofrecen una tasa de transmisión máxima de 10Gbps. Por tal motivo, para satisfacer estos requerimientos y admitir la implementación de diversas aplicaciones de manera eficiente es importante migrar a sistemas PON más actuales como NG-PON2.

Además, NG-PON2 mantiene características semejantes de las tecnologías PON predecesoras con el objetivo de garantizar la compatibilidad con las ODN existentes y de esta manera reducir los costos de implementación y operación de la nueva red.

2.2.4.1 Escenarios de migración a NG-PON2

De acuerdo a las necesidades de la red para NG-PON2 se especifican dos posibles escenarios de migración, los cuales se describen a continuación [19]:

- Escenario *greenfield*: es un área donde la tecnología PON todavía no ha sido desarrollada, por ende, si se requiere reemplazar a las tecnologías tradicionales basadas en cobre, los despliegues e implementaciones de las tecnologías PON, en este caso de NG-PON2, se deben realizar desde cero. Por ende, en este escenario el requisito de coexistencia con sistemas PON heredados no es necesario.
- Escenario *brownfield*: es un área donde la tecnología PON ya ha sido implementada, por lo tanto, la infraestructura existente es reutilizada para ofrecer servicios que demandan de mayores velocidades de transmisión u otras características, por medio de sistemas PON más actuales como NG-PON2. Este escenario a diferencia del anterior debe cumplir con ciertos requisitos como: mantener la coexistencia entre sistemas PON heredados, garantizar un tiempo mínimo en la interrupción del servicio durante la migración y admitir todos los servicios de las tecnologías PON heredadas en caso de una migración completa.

2.2.4.2 Rutas de migración a NG-PON2

Durante la migración a NG-PON2 se debe garantizar que los servicios que operan en la infraestructura existente no experimenten ninguna interrupción, por lo tanto, los sistemas NG-PON2 deben ser capaces de migrar a los usuarios bajo demanda y sobre todo admitir rutas de migración de tecnologías PON existentes a NG-PON2.

Existen tres opciones disponibles de rutas de migración a NG-PON2, las cuales se encuentran clasificadas en función del nivel de flexibilidad [19]. Estas tres opciones se describen a continuación:

- Migración en línea recta: Es un tipo de migración que se realiza de forma progresiva, en base al orden de la generación PON, es decir, primero se requiere de una migración completamente finalizada entre GPON y XG-PON, antes de iniciar con las actualizaciones de XG-PON a NG-PON2.
- Migración flexible: Este tipo de migración se realiza de forma directa desde GPON hasta NG-PON2, por lo tanto, se requiere que haya coexistencia entre dichos sistemas PON.
- Migración global: Este tipo de migración combina las funciones de las dos alternativas antes mencionadas, ya que, permite a GPON y XG-PON migrar a NG-PON2 de forma progresiva y directa. Además, esta opción provee a los operadores el mayor nivel de flexibilidad, sin embargo, es la más difícil de implementar debido a las diversas longitudes de onda que se requieren.

De igual manera, es importante mencionar que cualquier opción que se elija, deberá ser factible la migración de un usuario desde GPON/XG-PON hasta NG-PON2, por medio del reemplazo de su respectiva ONU a una que sea del tipo *colourless* [19].

2.2.4.3 Coexistencia entre NG-PON2 y tecnologías PON heredadas

La coexistencia entre dos generaciones de sistemas PON facilita el proceso de la migración, de igual manera, permite realizar despliegues de nuevas conexiones PON sin la necesidad de interrumpir el servicio. NG-PON2 para posibilitar la coexistencia con las tecnologías PON heredadas, es capaz de reutilizar la infraestructura de las ODN existentes y operar sobre espectros ópticos que se encuentren disponibles.

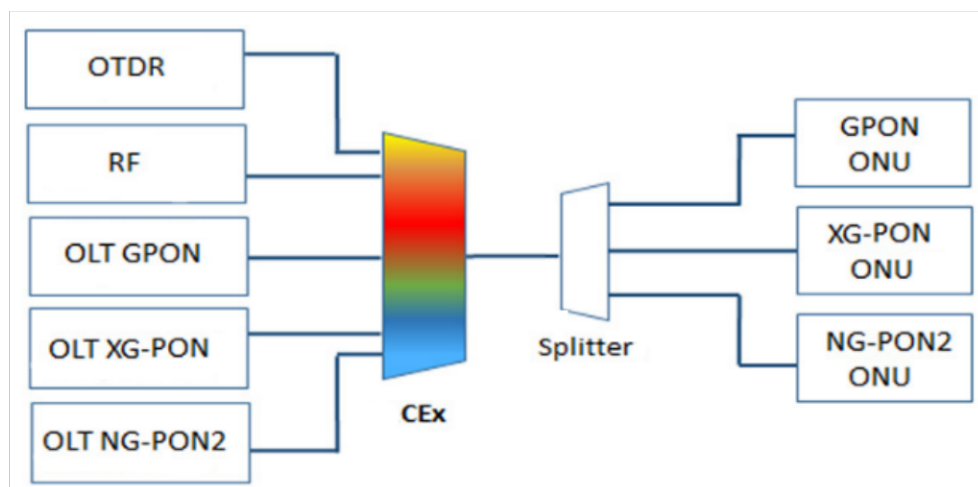


Figura 2.14. Arquitectura de referencia para la coexistencia entre NG-PON2 y los sistemas PON heredados [23].

De la arquitectura de referencia mostrada en la figura 2.14, se puede mencionar que la ODN, está constituida por un *splitter* y un elemento de coexistencia (CE, *Coexistence Element*), el cual se define como un dispositivo WDM que opera tanto en sentido descendente como ascendente y es utilizado para combinar los servicios de GPON con sistemas PON más actuales como: XG-PON y NG-PON2 o señales OTDR (*Optical Time Domain Reflectometer*)²⁰ y video RF, mediante conexiones entre las OLT de cada tecnología PON y los diferentes puertos del elemento de coexistencia. Además, la característica principal de este tipo de dispositivo es que todos los sistemas PON antes mencionados pueden implementarse sobre una misma ODN [21] [23].

²⁰ OTDR, es un instrumento empleado para monitorear enlaces ópticos, estimar la distancia de la fibra o para detectar posibles fallas en la ODN como: atenuaciones, pérdidas por fusiones, pérdidas por conectores o incluso cortes en la fibra.

De igual manera, un aspecto fundamental que se debe considerar en la coexistencia entre NG-PON2 y las tecnologías PON heredadas es el plan de longitudes de onda [20]. En la figura 2.15 se indican las bandas de longitud de onda para cada sistema PON que puede mantener coexistencia con NG-PON2.

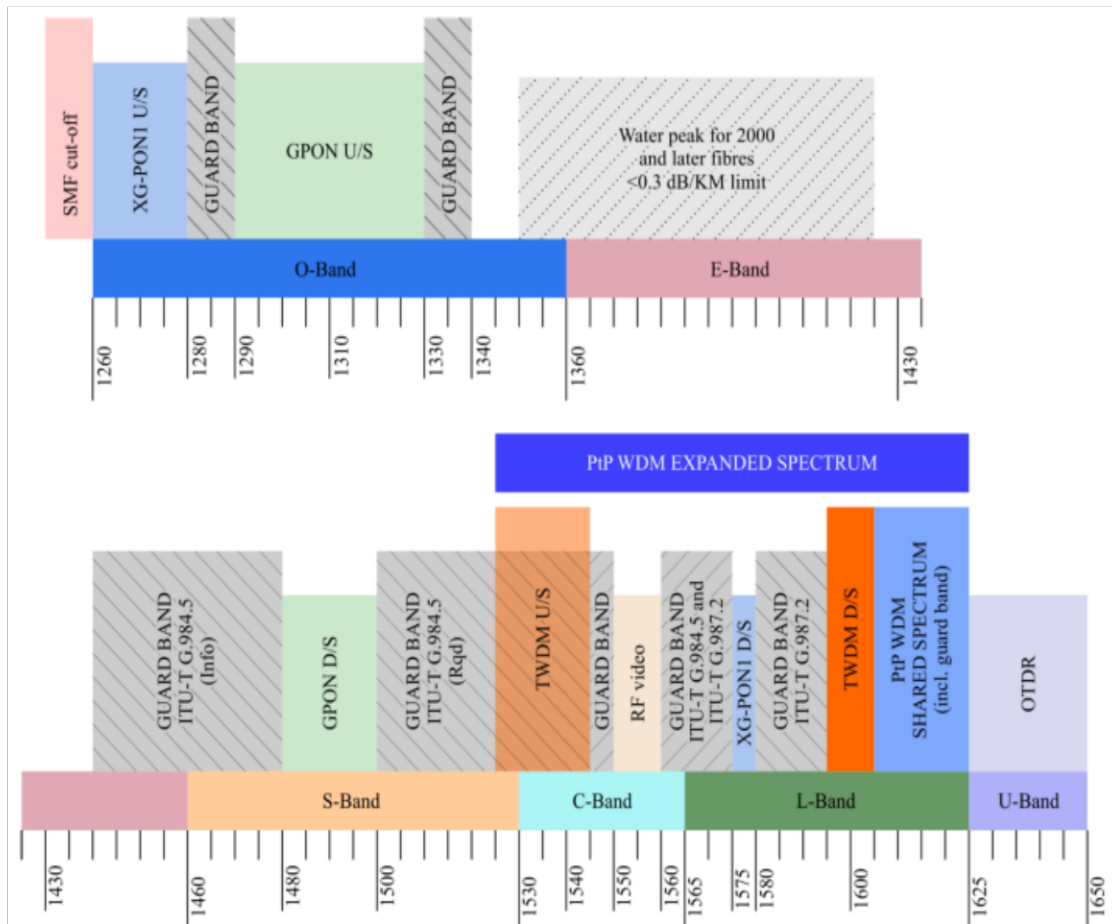


Figura 2.15. Plan de longitudes de onda para la coexistencia entre NG-PON2 y tecnologías PON heredadas [20].

3. RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Elegir una tecnología de acceso óptima para el despliegue e implementación de una red PON, que garantice el funcionamiento de los nuevos servicios de telecomunicaciones, no es un proceso sencillo, ya que intervienen diversos factores que se deben tener en cuenta como: la capacidad, la escalabilidad, la funcionalidad, los costos, etc. Por lo tanto, es importante realizar un análisis técnico comparativo que permita determinar qué tecnología presenta las mejores características o implica una mayor limitación.

En el presente capítulo, se expone un análisis técnico comparativo de las redes de acceso 50G-EPON y NG-PON2. Sin embargo, es importante mencionar que dicho análisis toma en consideración parámetros fundamentales de la capa física, específicamente de la subcapa PMD de las redes antes mencionadas. Los aspectos relacionados a la capa 2 como: la generación de tramas, protocolos de capa 2, subcapa TC, etc. no son tomados en cuenta para el presente análisis comparativo pues están fuera del alcance de este trabajo.

Por último, en el presente capítulo se incluyen las respectivas conclusiones y recomendaciones, obtenidas del análisis técnico comparativo de las redes de nueva generación antes mencionadas.

3.1 ANÁLISIS TÉCNICO COMPARATIVO ENTRE LAS REDES 50G-EPON Y NG-PON2

A continuación, se presenta un análisis técnico comparativo de los principales parámetros de las redes 50G-EPON y NG-PON2, en base a las características de su correspondiente subcapa PMD descritas en el capítulo 2.

3.1.1 ESTANDARIZACIÓN

Las redes de acceso de nueva generación NG-PON2 y 50G-EPON, están estandarizadas por dos diferentes organizaciones de telecomunicaciones, la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU) y el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE) respectivamente.

Las redes 50G-EPON están definidas bajo el estándar IEEE 802.3ca, el cual fue aprobado en junio de 2020. Por su parte, NG-PON2 se encuentra estandarizada en la serie ITU-T

G.989.x, la cual está constituida por tres recomendaciones, descritas en la tabla 2.7 del capítulo 2.

Tal como se mencionó anteriormente, en las redes PON en estudio están involucrados dos organismos de estandarización diferentes, la ITU y el IEEE, por consiguiente, para garantizar una interoperabilidad total entre las diversas redes de acceso ópticas pasivas es necesario que haya coexistencia entre las redes PON de nueva generación con sus correspondientes redes PON predecesoras, es decir, NG-PON2 debe mantener la coexistencia con las tecnologías GPON o XG-PON y 50G-EPON con las redes GEPON o 10G-EPON.

3.1.2 ARQUITECTURA

Las arquitecturas de 50G-EPON y NG-PON2, tal como se observan en las figuras 2.1 y 2.9 presentadas en el capítulo 2, están constituidas básicamente por elementos similares como: la OLT, la ODN y las diferentes ONU. De igual manera, las dos arquitecturas operan con múltiples canales y en comparación al modelo de referencia OSI trabajan solamente en las dos primeras capas, es decir, la capa física y la capa de enlace de datos.

Además, las arquitecturas de 50G-EPON y NG-PON2 presentan ciertas mejoras en relación a las arquitecturas que heredan de sus tecnologías PON predecesoras como: GEPON, 10G-EPON, GPON y XG-PON respectivamente. En el caso de 50G-EPON su arquitectura incluye subcapas para la operación multicanal como MCRS (*Multi-Channel Reconciliation Sublayer*) y MPMC (*Multi-Point MAC Control*). Por su parte, NG-PON2 en su arquitectura incorpora un multiplexor de longitud de onda y es capaz de admitir la operación de tecnologías novedosas como TWDM (*Time and Wavelength Division Multiplexing*) y PtP WDM (*Point-to-Point Wavelength Division Multiplexing*), las cuales permiten proveer del servicio no solo a usuarios residenciales o corporativos, sino también satisfacer las nuevas demandas de servicio como el *fronthaul* de las redes celulares.

A pesar de que las arquitecturas de 50G-EPON y NG-PON2 comparten ciertas características como la operación con múltiples canales, existen ciertos aspectos en los cuales dichas arquitecturas se diferencian. Estos aspectos se describen a continuación:

- La arquitectura de NG-PON2 puede ser punto a multipunto cuando trabaja con TWDM y punto a punto cuando opera con PtP WDM. Por ende, con NG-PON2 se pueden ofrecer servicios compartidos y dedicados. Por su parte, la arquitectura de 50G-EPON es únicamente punto a multipunto (P2MP, *Point-to-Multi-Point*), por lo

tanto, este tipo de red de acceso provee solamente servicios compartidos con despliegues de fibra hasta el hogar (FTTH).

- En la arquitectura de NG-PON2, específicamente en la ODN se pueden emplear extensores de alcance para lograr mayores distancias de transmisión, lo que permitiría incrementar el área de cobertura proporcionada y, por ende, dotar del servicio a usuarios que se encuentren alejados de la oficina central. Con respecto a 50G-EPON, en su arquitectura no se especifica la utilización de este dispositivo.
- En la arquitectura de NG-PON2 las diferentes ONU están constituidas por un transmisor y receptor sintonizables, que permiten ajustarse a los canales de longitud de onda TWDM o PtP WDM. En cambio, en 50G-EPON las ONU no cuentan con dicha capacidad de sintonización, por consiguiente, el costo de fabricación de sus ONU en comparación al de las ONU *colourless* empleadas en NG-PON2 es menor.
- Cuando NG-PON2 trabaja con PtP WDM admite la operación sobre arquitecturas híbridas, es decir el nodo de derivación estará constituido por la combinación de un *splitter* óptico y un filtro de longitud de onda CAWG (ver figura 2.13). Con respecto a 50G-EPON no se permiten arquitecturas híbridas, ya que su ODN admite solamente la utilización de los *splitter* ópticos, dificultando de esta manera incrementar la relación de división de los *splitter* para una misma clase de ODN.

3.1.3 CLASES DE ODN

Las diferentes clases de ODN que admiten las redes de acceso 50G-EPON y NG-PON2, están determinadas en función de los valores mínimo y máximo de las pérdidas de inserción de canal (50G-EPON) o pérdidas de trayecto óptico (NG-PON2).

Las redes 50G-EPON son capaces de admitir dos diferentes clases de ODN, conocidas como: de potencia media y de potencia alta. Por su parte, las redes NG-PON2 tienen la capacidad de admitir cuatro distintas clases de ODN, denominadas como: nominal 1, nominal 2, extendida 1 y extendida 2, las cuales permiten garantizar a este tipo de redes de acceso, flexibilidad y escalabilidad para la implementación de diversos escenarios, en los que se incluyen dispositivos como extensores de alcance, filtros de longitud de onda AWG, etc.

A continuación, en la tabla 3.1 se detallan los valores mínimos y máximos de las pérdidas para estas clases de ODN.

Tabla 3.1. Clases de ODN de 50G-EPON y NG-PON2 [16], [20].

Tecnología	Clase de ODN	Valor Mínimo [dB]	Valor Máximo [dB]	Diferencia [dB]
50G-EPON	Potencia media	10	24	14
	Potencia alta	15	29	
NG-PON2	Nominal 1 (N1)	14	29	15
	Nominal 2 (N2)	16	31	
	Extendida 1 (E1)	18	33	
	Extendida 2 (E2)	20	35	

Las redes NG-PON2, tal como se observa en la tabla 3.1 admiten valores de pérdida de trayecto óptico mayores a los que se presentan en 50G-EPON. Por lo tanto, NG-PON2 a comparación de 50G-EPON, permite alcanzar mayores distancias de transmisión y, además, provee la capacidad de soportar una mayor relación de división de los *splitter* (1:256), facilitando de esta manera que los servicios ofrecidos lleguen a una mayor cantidad de usuarios.

Con respecto, a los rangos de pérdida establecidos para dichas redes de acceso, estos comparten cierta similitud, ya que el resultado obtenido de la diferencia entre los valores máximos y mínimos únicamente difiere en 1dB.

3.1.4 PLAN DE LONGITUD DE ONDA

El plan de longitud de onda para 50G-EPON fue desarrollado con el objetivo de mantener la coexistencia con las tecnologías PON heredadas como: GPON, GEPON, XG-PON y 10G-EPON. De igual manera, el plan de longitud de onda para NG-PON2 además de compartir el mismo objetivo de la coexistencia, permite garantizar la flexibilidad espectral, enfoque que otorga a NG-PON2 la capacidad para adaptarse a diversos escenarios de implementación y expansión futura.

En las tablas 2.2 y 2.11 presentadas en el capítulo 2 se detallan los planes de longitud de onda asignados a las redes de acceso 50G-EPON y NG-PON2 respectivamente.

A pesar de compartir objetivos similares, los planes de longitud de onda de estas redes de acceso se diferencian en varios aspectos, los cuales se describen a continuación:

- La asignación de las longitudes de onda para 50G-EPON permite operar solamente en la banda O, es decir, en la segunda ventana, por consiguiente, no es posible implementar escenarios de coexistencia simultánea con GEPON y 10G-EPON, ya que para su operación se emplean rangos de longitud de onda semejantes a los

establecidos para 50G-EPON. Con respecto, a NG-PON2 la asignación de las longitudes de onda es más amplia, por lo que se puede trabajar en más bandas de operación como las bandas C, L y S, dicho de otra manera, en las ventanas tres, cuatro y cinco respectivamente, por ende, al tener un mayor espectro óptico se puede garantizar la flexibilidad espectral y evitar de esta manera la interferencia con las tecnologías PON predecesoras.

- El número de longitudes de onda que emplean 50G-EPON y NG-PON2 para cumplir con los requerimientos de las tasas de transmisión que se ofrecen depende si dichas velocidades son simétricas, asimétricas o de la tecnología que se utilice. Por ejemplo: en 50G-EPON para velocidades asimétricas se utilizan dos longitudes de onda en sentido descendente y una longitud de onda en sentido ascendente, para lograr velocidades simétricas se emplean dos longitudes de onda tanto en sentido descendente como ascendente. Con respecto, a NG-PON2 independientemente de la tecnología (TWDM o PtP WDM) y del tipo de velocidad que se requiera lograr, se necesita un mínimo de cuatro longitudes de onda tanto en *downlink* como en *uplink* para TWDM y PtP WDM. Además, el número máximo de longitudes de onda para TWDM es de ocho, para PtP WDM este valor no se especifica. Este aspecto se aprecia con mayor detalle en la tabla 3.2.
- En 50G-EPON a pesar de que se asignan bandas de longitud de onda, el estándar especifica ciertas longitudes de onda centrales a utilizarse, aspecto que en NG-PON2 no existe, debido a que se trabaja con un gran número de longitudes de onda y se puede emplear cualquier longitud de onda de la banda asignada.
- Las redes NG-PON2 en comparación a las redes 50G-EPON admiten una mayor variedad de escenarios de coexistencia, debido a que NG-PON2 al garantizar la flexibilidad espectral, permite mantener la coexistencia simultáneamente con sus tecnologías PON predecesoras como GPON y XG-PON. En cambio, 50G-EPON mantiene la coexistencia con sus tecnologías PON predecesoras de forma independiente, ya que GEPON y 10G-EPON trabajan con rangos de longitudes de onda similares, por ende, no es factible la coexistencia simultánea entre las tres generaciones de redes de acceso desarrolladas por el IEEE.

3.1.5 VELOCIDADES DE TRANSMISIÓN

Las redes de nueva generación 50G-EPON y NG-PON2 a diferencia de sus tecnologías PON predecesoras mencionadas anteriormente, son capaces de ofrecer tasas de transmisión simétricas y asimétricas de gran capacidad.

A continuación, en la tabla 3.2 se indican los valores de las diferentes opciones de velocidades de transmisión con las cuales pueden trabajar las redes de acceso 50G-EPON y NG-PON2.

Tabla 3.2. Velocidades de transmisión para 50G-EPON y NG-PON2 [16], [20].

Tecnología	Categoría	Tasas de transmisión en downlink [Gbps]	Tasas de transmisión en uplink [Gbps]	Número de λ de operación
50G-EPON	Tipo 1	25	10	2↓ y 1↑
	Tipo 2	25	25	
	Tipo 3	25	25	2↓↑
NG-PON2 TWDM	Opción 1	10	2.5	4↓↑ - 8↓↑
	Opción 2	10	10	
	Opción 3	2.5	2.5	
NG-PON2 PtP WDM	Clase 1	1.2288 - 1.2500	1.2288 - 1.2500	4↓↑ - n↓↑
	Clase 2	2.4576 - 2.6660	2.4576 - 2.6660	
	Clase 3	6.1440 - 11.090	6.1440 - 11.090	

De las diferentes velocidades de transmisión detalladas en la tabla 3.2 se pueden describir las siguientes particularidades:

- Las redes de nueva generación 50G-EPON y NG-PON2 proporcionan una gran escalabilidad y flexibilidad, ya que cada una de estas redes de acceso presentan al menos tres diferentes configuraciones de velocidades de transmisión.
- La capacidad (25Gbps) por longitud de onda que presentan las redes de acceso 50G-EPON es superior a la capacidad (10Gbps) por longitud de onda de las redes NG-PON2. Sin embargo, NG-PON2 al trabajar con un mayor número de longitudes de onda en relación a 50G-EPON, permite proveer tasas de transmisión más altas. Por ejemplo, cuando NG-PON2 trabaja con TWDM y emplea ocho longitudes de onda es capaz de proporcionar 80Gbps tanto en *downlink* como en *uplink*. De igual manera, cuando NG-PON2 trabaja con PtP WDM las tasas de transmisión se incrementan, sin embargo, se desconoce su límite máximo, ya que, el número máximo de longitudes de onda a emplearse no se especifica en el estándar.
- Las redes de acceso NG-PON2 cuando operan con TWDM son capaces de proporcionar tasas de transmisión tanto simétricas como asimétricas. En cambio, si NG-PON2 trabaja con PtP WDM, se provee solamente velocidades de transmisión simétricas, las cuales están determinadas por los servicios dedicados que se ofrecen (ver tabla 2.10), a su vez, estas velocidades de transmisión simétricas permiten satisfacer la nueva demanda de los servicios de telecomunicaciones como es el caso del *fronthaul* de las redes móviles, el cual requiere de grandes tasas de transmisión para su correcto funcionamiento.

3.1.6 ALCANCES Y RELACIÓN DE DIVISIÓN DE LOS SPLITTER

Los alcances que se pueden lograr con los sistemas NG-PON2 dependen en cierta manera de la utilización o no de extensores de alcance intermedios, ya que se pueden obtener distancias de hasta 40km sin la necesidad de emplear dichos dispositivos; pero, si se usan los extensores de alcance se pueden lograr distancias de hasta 60km. Además, NG-PON2 admite una relación máxima de división de los *splitter* de 1:256.

Por su parte, el estándar IEEE 802.3ca para 50G-EPON, no define valores máximos para el alcance, ni para la relación de división de los *splitter*, solamente especifica que se pueden lograr alcances de al menos 20km y que su relación de división de los *splitter* es de al menos 1:32. Adicionalmente, es importante mencionar que la utilización de extensores de alcance en la arquitectura de 50G-EPON no se especifica en dicho estándar.

Por ende, las redes NG-PON2 independientemente de la utilización o no de los extensores de alcance permiten alcanzar una mayor área de cobertura, en comparación a las redes 50G-EPON, las cuales no admiten la utilización dicho dispositivo. De igual manera, NGPON-2 al emplear relaciones de división de los *splitter* más grandes, son capaces de proveer sus servicios a una mayor cantidad de clientes.

3.1.7 TIPO DE FIBRA ÓPTICA

A continuación, en la figura 3.1 (en donde se indican los valores de atenuación y del coeficiente de dispersión cromática²¹ de las fibras normalizadas G.652 para cada una de las bandas de operación), se observa el por qué los estándares IEEE 802.3ca e ITU-T G989.x sugieren específicamente el uso de la fibra de subcategoría G.652.D para los despliegues de las redes de acceso 50G-EPON y NG-PON2 respectivamente [16], [19].

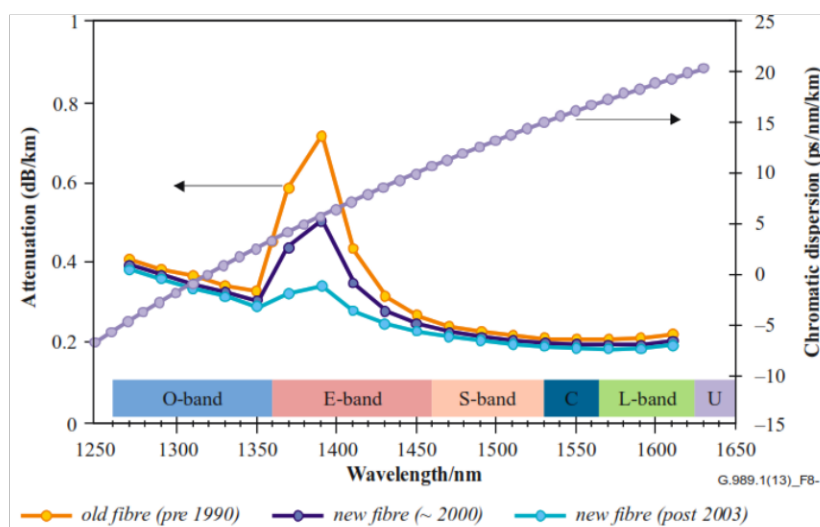


Figura 3.1. Atenuación y dispersión cromática de la fibra G.652 [19].

Tal como se observa en la figura 3.1, la fibra obsoleta G.652 *legacy* (G.652.A - línea naranja), estaba diseñada para trabajar solamente en la banda de operación O (segunda ventana) y opcionalmente en la banda C (tercera ventana), ya que la dispersión cromática nula para esta fibra se da a 1310nm. Por su parte, la operación en la banda E era imposible, debido a la alta atenuación que existía por el pico de agua a 1383nm. Sin embargo, al perfeccionar los procesos de fabricación de la fibra se ha podido superar progresivamente este problema; por ejemplo, las fibras G.652.C (línea morada), conocidas como LWP (*Low Water Peak*) permiten reducir de cierta manera el pico de agua, no obstante, su valor de atenuación sigue siendo alto para despliegues a gran alcance.

Por tal motivo, los estándares mencionados anteriormente recomiendan la nueva fibra G.652.D (línea celeste), ya que al ser del tipo ZWP (*Zero Water Peak*), elimina el pico de atenuación que existe en la banda E, garantizando de esta manera la operación en dicha banda y permitiendo la transmisión en un gran ancho de banda, es decir, en las bandas: O, E, S, C y L. Además, tal como se aprecia en la figura 3.1, para todas las bandas de operación antes mencionadas, la subcategoría G.652.D presenta valores de atenuación pequeños desde 0.2dB/km hasta 0.4 dB/km.

Por lo tanto, la subcategoría G.652.D es ideal para el despliegue de las redes de nueva generación 50G-EPON, ya que opera en la banda O (segunda ventana) y especialmente de NG-PON2, debido a que dicha tecnología opera en las bandas C, L y S, es decir, tercera, cuarta y quinta ventana respectivamente. También, las fibras G.652.D en comparación al resto de subcategorías presentan valores de dispersión cromática relativamente bajos, los cuales a pesar de que se incrementan linealmente con las distancias de transmisión, no son un problema para los alcances que ofrecen las redes de nueva generación (desde 20km hasta 60km con extensores de alcance), ya que a dichas distancias los valores de dispersión no varían significativamente, por consiguiente, no se requiere de la implementación de módulos compensadores de dispersión²² en sus respectivas arquitecturas.

²¹ Coeficiente de *dispersión cromática*, es un valor de dispersión constituido por la suma del coeficiente de la dispersión de material o espectral y el coeficiente de la dispersión de guía de onda. Su medición se realiza en unidades de ps/nm*km, las cuales indican que un pulso óptico con una anchura espectral de 1 nm se ensanchará 1 ps por cada km que viaje.

²² *Módulos compensadores de dispersión*, son dispositivos pequeños constituidos usualmente por varios metros o kilómetros de fibra DCF (*Dispersion Compensating Fiber*), la cual se caracteriza por poseer un valor de coeficiente de dispersión cromática elevado y de signo contrario al de la fibra de transmisión, parámetros que garantizan la reducción de la dispersión cromática en un enlace óptico.

De igual manera, los estándares de 50G-EPON y NG-PON2, recomiendan que para conexiones de último tramo o para cableado dentro de la casa de los abonados, se empleen fibras monomodo de la subcategoría G.657.A, debido a que dicha fibra posee compatibilidad de campo modal con la fibra G.652.D y, también por qué son muy flexibles y resistentes a pérdidas producidas por macro curvaturas.

3.1.8 CARACTERÍSTICAS ADICIONALES

A continuación, en base a los requerimientos generales de las subcapas PMD tanto de 50G-EPON como de NG-PON2 descritas y estudiadas en el capítulo 2 y del análisis técnico comparativo de dichos parámetros realizado en el presente capítulo, se expone por medio de la tabla 3.3 una síntesis de las características más importantes de las redes de acceso 50G-EPON y NG-PON2, con el propósito de determinar de manera exacta cuál de estas dos redes de nueva generación ofrece las mejores prestaciones o implica una mayor limitación.

Tabla 3.3. Características generales de la subcapa PMD de 50G-EPON y NG-PON2
Parte 1 [16], [19], [20].

RED DE ACCESO	TIPO O TECNOLOGÍA	CARACTERÍSTICAS		
		Estándar	Tasa de transmisión en downlink/uplink [Gbps]	Número de λ de operación
50G-EPON	50/10-PQ20G 50/10-PQ30G	IEEE 802.3ca	25 / 10	2↓ / 1↑
	50/10-PQ20X 50/10-PQ30X			
	50/25-PQ20G 50/25-PQ30G		25 / 25	2↓ / 1↑
	50/25-PQ20X 50/25-PQ30X			
	50/50-PQ20 50/50-PQ30		25 / 25	2↓↑ / 2↓↑
	50/50-PQ20X 50/50-PQ30X			
NG-PON2	TWDM	Serie ITU-T G989.x	Opción 1: 10 / 2.5 Opción 2: 10 / 10 Opción 3: 2.5 / 2.5	Opción 1: 4↓↑ - 8↓↑ Opción 2: 4↓↑ - 8↓↑ Opción 3: 4↓↑ - 8↓↑
	PtP WDM		Clase 1: 1.22 - 1.25 / 1.22 - 1.25 Clase 2: 2.45 - 2.66 / 2.45 - 2.66 Clase 3: 6.14 - 11.09 / 6.14 - 11.09	Clase 1: 4↓↑ - n↓↑ Clase 2: 4↓↑ - n↓↑ Clase 3: 4↓↑ - n↓↑

Tabla 3.3. Características generales de la subcapa PMD de 50G-EPON y NG-PON2
Parte 2 [16], [19], [20].

RED DE ACCESO	TIPO O TECNOLOGÍA	CARACTERÍSTICAS		
		Rango de λ en downlink [nm]	Rango de λ en uplink [nm]	Rango de pérdidas del trayecto óptico [dB]
50G-EPON	50/10-PQ20G 50/10-PQ30G	1358 \pm 2 1342 \pm 2	1270 \pm 10	P. media (2): 10 - 24 P. alta (3): 15 - 29
	50/10-PQ20X 50/10-PQ30X		1300 \pm 10	
	50/25-PQ20G 50/25-PQ30G		1270 \pm 10	
	50/25-PQ20X 50/25-PQ30X		1300 \pm 10	
	50/50-PQ20 50/50-PQ30		1270 \pm 10 y 1300 \pm 10	
	50/50-PQ20X 50/50-PQ30X		1300 \pm 10 y 1320 \pm 2	
	NG-PON2		TWDM	
PtP WDM		Espectro expandido: 1524 - 1625 Espectro compartido: 1603 - 1625		

Tabla 3.3. Características generales de la subcapa PMD de 50G-EPON y NG-PON2
Parte 3 [16], [19], [20].

RED DE ACCESO	TIPO O TECNOLOGÍA	CARACTERÍSTICAS				Coexistencia con:
		Alcance [Km]	Relación de división de los splitter	Tipo de fibra	Código de línea	
50G-EPON	50/10-PQ20G 50/10-PQ30G	\geq 20 (el uso de extensores de alcance, no se especifica en el estándar)	\geq 1:32 (el valor máximo, no se especifica en el estándar)	Fibras monomodo G.652.D y G.657.A	256B / 257B	GPON o GEPON
	10G-EPON					
	GPON o GEPON					
	10G-EPON					
	N/A					
	10G-EPON					
NG-PON2	TWDM	40 sin extensores de alcance 60 con extensores de alcance	Máx. 1:256		NRZ	Con todas sus tecnologías PON predecesoras GPON y XG-PON
	PtP WDM					

En función de las características de ambas tecnologías PON sintetizadas en la de la tabla 3.3, se puede afirmar que las redes NG-PON2 en comparación a las redes 50G-EPON presentan mayores beneficios y prestaciones, las cuales se detallan a continuación.

- **Arquitectura:** Las redes NG-PON2 en comparación a las redes 50G-EPON ofrecen una arquitectura más robusta, ya que su ODN permite la utilización de extensores de alcance para incrementar el área de cobertura. Además, cuando NG-PON2 trabaja con PtP WDM admite la operación sobre arquitecturas híbridas, es decir, en la ODN se pueden combinar los *splitter* ópticos con los filtros de longitud de onda AWG, permitiendo de esta manera aumentar los niveles de *splitting* para una misma clase de ODN. También, las diversas ONU que se utilizan en NG-PON2 son del tipo *colourless*, ya que están constituidas por un transmisor y receptor sintonizables, los cuales tienen como finalidad ajustarse a los canales de longitud de onda TWDM o PtP WDM asignados. Esta capacidad de sintonización permite a NG-PON2 garantizar la flexibilidad espectral, facilitar la operación y el mantenimiento de la red, sin embargo, el costo de fabricación de este tipo de ONU es mayor en relación al de las ONU tradicionales, es decir, aquellas que no cuenta con dicha capacidad de sintonización.
- **Tasas de transmisión:** Las redes NG-PON2 al trabajar con un número mayor de longitudes de onda, son capaces de ofrecer tasas de transmisión superiores a las proporcionadas por 50G-EPON. Por ejemplo: la tasa de transmisión máxima que ofrece 50G-EPON es de 50Gbps (al emplear 2 longitudes de onda) tanto en *downlink* como en *uplink*. Por su parte, NG-PON2 cuando trabaja con TWDM ofrece una tasa de transmisión simétrica máxima de 80Gbps (al utilizar 8 longitudes de onda). De igual manera, cuando NG-PON2 opera con PtP WDM las tasas de transmisión que proveen poseen una gran capacidad, sin embargo, al no especificarse el número máximo de longitudes de onda a emplearse, se desconoce el límite máximo que podrían llegar a tener dichas velocidades de transmisión.
- **Plan de longitud de onda:** El espectro óptico asignado a las redes NG-PON2 en comparación al de las redes 50G-EPON es mayor, debido a que 50G-EPON solamente trabaja en la banda O, mientras que NG-PON2, tiene la capacidad de trabajar en más bandas de operación (C, L y S), facilitando y garantizando de esta manera la flexibilidad espectral. Aspecto que permite a NG-PON2 admitir diversos escenarios de coexistencia, mediante los cuales se puede evitar la interferencia con sus correspondientes tecnologías PON heredadas. Adicionalmente, desde el punto de vista de la atenuación, la mejor banda para comunicaciones ópticas, es decir,

aquella que presenta la menor atenuación, es la banda C, seguida de las bandas L, S y O. Sin embargo, existe una relación directamente proporcional entre el costo de fabricación de los dispositivos ópticos y el orden asignado a las ventanas de transmisión, dicho de otra manera, los elementos que operan en tercera ventana (banda C) tienen un costo superior a los dispositivos que trabajan en segunda ventana (banda O). Por lo tanto, la implementación de una determinada red de acceso dependerá de las necesidades y recursos económicos que dispongan los proveedores de servicios de internet (ISP).

- Clases de ODN: Los valores de los diferentes rangos de pérdidas de trayecto óptico que admite NG-PON2 son mayores a los que se presentan en 50G-EPON. Por ende, NG-PON2 permite lograr mayores áreas de cobertura (60km con extensores de alcance). Además, al admitir mayores valores de pérdidas se pueden emplear relaciones de división de los *splitter* más grandes (1:256) en relación a 50G-EPON, aspecto que permite garantizar que los diferentes servicios sean proporcionados a una mayor cantidad de subscriptores.
- Coexistencia: Las redes NG-PON2 gracias a la flexibilidad espectral son capaces de mantener la coexistencia de forma simultánea con todas sus tecnologías PON predecesoras como GPON y XG-PON. Por su parte, 50G-EPON mantiene la coexistencia con una sola tecnología PON predecesora (GEPON o 10G-EPON) a la vez, además, es importante mencionar que los enlaces simétricos de 50Gbps (50/50-PQ20 y 50/50-PQ30) no mantienen coexistencia con GEPON, debido a que dicha tecnología trabaja con las mismas longitudes de onda que los enlaces simétricos.

3.2 CONCLUSIONES

A continuación, se presentan las conclusiones obtenidas del análisis técnico comparativo entre las redes de acceso 50G-EPON y NG-PON2, realizado en el presente trabajo de integración curricular.

- De lo expuesto en este trabajo, se puede concluir que los objetivos planteados como: el estudio de las principales características técnicas de 50G-EPON y NG-PON2 en base a los estándares IEEE 802.3ca e ITU-T G.989.x, y la realización del análisis técnico comparativo entre dichas tecnologías ha sido logrado satisfactoriamente, pues estos aspectos se describen apropiadamente en los capítulos 2 y 3. De igual manera, el alcance propuesto ha sido cumplido exitosamente, debido a que el análisis técnico comparativo presentado en este

trabajo está enfocado a las características generales y especificaciones de la subcapa PMD, tanto de 50G-EPON como de NG-PON2.

- La metodología empleada para el desarrollo del presente trabajo de integración curricular como: la técnica del análisis documental para la recopilación y procesamiento de la información, así como la elaboración de tablas de resumen como técnica para el análisis de la información, han permitido lograr de manera satisfactoria los objetivos y el alcance propuestos, ya que se ha identificado adecuadamente las ventajas y limitaciones de cada una de las tecnologías de nueva generación expuestas en este trabajo.
- La Unión Internacional de Telecomunicaciones y el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos, desarrollan nuevos estándares como: el IEEE 802.3ca (50G-EPON) y la serie ITU-T G989.x (NG-PON2), con nuevas funcionalidades y capacidades superiores a los de sus tecnologías PON predecesoras, con el propósito de satisfacer los requerimientos de tasas de transmisión, que necesitan los actuales servicios de telecomunicaciones (como es el caso del *fronthaul* de las redes celulares) para su correcto funcionamiento.
- La arquitectura de las redes NG-PON2 en comparación al de las redes 50G-EPON, permite ofrecer mayores funcionalidades, debido a que su ODN puede admitir diversos dispositivos como: extensores de alcance, elementos de coexistencia o nodos de derivación (constituidos por la combinación de un *splitter* y un filtro de longitud de onda AWG), los cuales en el estándar que define a las redes 50G-EPON no se especifican.
- Uno de los principales aspectos que diferencian a las redes NG-PON2 de las redes 50G-EPON, es la capacidad de sintonización que poseen las diferentes ONU/ONT de NG-PON2, esta característica facilita el ajuste a los diferentes canales de longitud de onda que presentan TWDM y PtP WDM. Con respecto a las ONU/ONT de 50G-EPON, estas no poseen dicha capacidad de sintonización.
- Las redes NG-PON2 en comparación a las redes 50G-EPON, admiten una mayor variedad de servicios, ya que NG-PON2 al trabajar con TWDM permite proveer de servicios compartidos con despliegues de fibra hasta el hogar (FTTH), pero, si opera con PtP WDM se pueden proporcionar servicios dedicados como los puntos de acceso inalámbricos. Por su parte, 50G-EPON solamente ofrece servicios compartidos.
- Las redes de acceso 50G-EPON y NG-PON2 ofrecen una gran escalabilidad y flexibilidad en términos de velocidades de transmisión. Sin embargo, NG-PON2 independientemente de la tecnología que utilice para su operación (TWDM o PtP

WDM), siempre empleará una mayor cantidad de longitudes de onda que 50G-EPON, por lo tanto, es capaz de garantizar velocidades de transmisión superiores a las que se ofrecen en 50G-EPON.

- La mejor opción para migrar hacia las redes de nueva generación como 50G-EPON y NG-PON2, es cuando ya existe alguna tecnología PON implementada en determinada área (escenario *brownfield*), ya que de esta manera se puede reutilizar la infraestructura existente y aprovechar los beneficios que esta proporciona, por ejemplo, se puede garantizar el uso en su totalidad del tiempo de vida útil de la fibra óptica (aproximadamente de 25 a 30 años), con lo cual se puede reducir el tiempo y los altos costos que supondría su despliegue para la implementación de una tecnología PON desde cero.
- El escenario de migración *greenfield*, implica la utilización de una mayor cantidad de recursos en comparación al escenario *brownfield*, ya que se realiza un despliegue total de la red de acceso, sin embargo, garantiza a los proveedores de servicios de internet, lograr mejores prestaciones mientras se ofrecen los mismos servicios de las tecnologías PON predecesoras o se proveen de soluciones de gran capacidad, ya que al no tener que cumplir con los requisitos de coexistencia y al disponer de una arquitectura completamente nueva se puede soportar la utilización de relaciones de división de los *splitter* superiores, así como mayores tasas de transmisión y otras características adicionales.
- Mantener la coexistencia con tecnologías PON predecesoras en una misma ODN es de gran utilidad, ya que se puede incrementar la capacidad máxima de la red, en base a la demanda de los usuarios ya sean estos residenciales o corporativos. Por ejemplo, para satisfacer las tasas de transmisión convencionales (2.5Gbps) de usuarios residenciales, se puede emplear tecnologías tradicionales como GPON, XG-PON o 10G-EPON, sin embargo, si se necesita cumplir con los requerimientos de clientes corporativos es necesario utilizar redes nueva generación como 50G-EPON y NG-PON2, las cuales proporcionan velocidades de transmisión mayores a las de sus correspondientes tecnologías PON predecesoras.

3.3 RECOMENDACIONES

A continuación, se incluyen las recomendaciones derivadas del análisis técnico comparativo, entre las redes de acceso 50G-EPON y NG-PON2, desarrollado en el presente trabajo de integración curricular.

- Se recomienda estudiar y analizar las características y especificaciones generales del resto de subcapas que constituyen cada una de las arquitecturas de redes de acceso de nueva generación. Por ejemplo, en 50G-EPON se recomienda analizar especialmente las subcapas MCRS (*Multi-Channel Reconciliation Sublayer*) y MPMC (*Multi-Point MAC Control*), las cuales permiten la operación multicanal. Con respecto a NG-PON2, se sugiere estudiar la subcapa TC (*Transmission Convergence*), para conocer el proceso de generación de las tramas y los protocolos que intervienen en la comunicación. Este nuevo análisis ayudará a complementar la información proporcionada por este trabajo de integración curricular, para comprender de forma más amplia y detallada el funcionamiento total de las tecnologías de acceso de nueva generación antes mencionadas.
- Se recomienda realizar un estudio de factibilidad técnica-económica entre las redes de acceso 50G-EPON y NG-PON2, para determinar de forma específica en cuál de las dos tecnologías se tendría que invertir una mayor cantidad de recursos económicos tanto para su despliegue como implementación. Además, dicho estudio ayudaría a los proveedores de servicios de internet a lograr un claro entendimiento, para elegir adecuadamente la tecnología de acceso que mejor se adapte a sus requerimientos para sus posibles despliegues.
- Para futuros trabajos de integración curricular acerca de las redes de acceso 50G-EPON y NG-PON2, se recomienda desarrollar un diseño de la red, el cual permita establecer de manera detallada cuál de las dos tecnologías antes mencionadas ofrece mayores beneficios o implica mayores limitaciones, para un posible despliegue e implementación a futuro en el país.
- En nuestro país la tecnología de acceso que se encuentra mayormente desplegada es GPON, por tal motivo, se recomienda migrar de esta, a NG-PON2 ya que, de igual manera como se ha detallado en este trabajo de integración curricular, NG-PON2 presenta mejores beneficios y prestaciones que las redes de acceso 50G-EPON. Además, NG-PON2 al igual que GPON se encuentra estandarizada por la misma organización de telecomunicaciones, en este caso la ITU-T, facilitando de esta manera la migración o coexistencia y sobre todo garantizando una total interoperabilidad entre dichas tecnologías.
- Se recomienda a los proveedores de servicios de telecomunicaciones del país que se interesen más por los avances tecnológicos de este campo e inviertan una mayor cantidad de recursos económicos, para el despliegue e implementación de estas tecnologías, con el objetivo de generar redes de gran capacidad y sobre todo para seguir progresando tecnológicamente como país.

4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] R. Millán, "¿Qué es? NG-PON (Next Generation Passive Optical Network)," *BIT*, vol. 192, pp. 80–83, Marzo 2013.
- [2] C. Knittle, "IEEE 50 Gb/s EPON (50G-EPON)," 2020 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), 2020, pp. 1-3.
- [3] J. Wey, D. Nessel, M. Valvo, K. Grobe, H. Roberts, Y. Luo, y J. Smith, "Physical layer aspects of NG-PON2 standards-Part 1: Optical link design [Invited]," in *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 8, no. 1, pp. 33-42, 1 January 2016, doi: 10.1364/JOCN.8.000033.
- [4] D. Nessel, "NG-PON2 Technology and Standards," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 33, no. 5, pp. 1136-1143, 1 Marzo 1, 2015, doi: 10.1109/JLT.2015.2389115.
- [5] Unión Internacional de Telecomunicaciones, *Sistemas y medios de transmisión, sistemas y redes digitales, Serie G*. [En línea]. Available: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G/es>.
- [6] R. Millán, "Tecnologías de banda ancha por fibra óptica," *ACTA*, vol. 55, pp. 29-36, Marzo 2010.
- [7] E. López. (2015, Julio). Módulo 2: Arquitectura FTTH-PON [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/publication/280069225_FTTH_Course_-_Module_2.
- [8] Hitron. What is the Difference Between ONT & ONU? [En línea]. Available: <https://us.hitrontech.com/learn/what-is-the-difference-between-ont-onu/?cn-reloaded=1>.
- [9] "Comunicaciones Ópticas", Notas de clase de IEE7D4, Departamento de Electrónica, Telecomunicaciones y Redes de Información, Escuela Politécnica Nacional, 2020-A.
- [10] C. Radicelli, M. Pomboza, M. Samaniego y E. Villacrés, " Red óptica pasiva para proveer de Internet a la ciudad de Riobamba - Ecuador," *ESPACIOS*, vol. 40, no. 40, pp. 12, Noviembre 2019.
- [11] M. López, E. Moschim y F. Rudge, "ESTUDIO COMPARATIVO DE REDES GPON Y EPON," *Scientia Et Technica*, vol. 15, no. 41, pp. 321-326, Mayo 2009.
- [12] M. Abreu, A. Castagna, P. Cristiani, P. Zunino, E. Roldós y G. Sandler, "CARÁCTERÍSTICAS GENERALES DE UNA RED DE FIBRA ÓPTICA AL HOGAR (FTTH)," *Memoria de Trabajos de Difusión Científica y Técnica*, no. 7, pp. 38-46, 2009.

- [13] H. Nakamura, "[Tutorial]: NG-PON2 Technologies," 2013 Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC), 2013, pp. 1-51.
- [14] "Comunicación Digital", Notas de clase de IEE7H4, Departamento de Electrónica, Telecomunicaciones y Redes de Información, Escuela Politécnica Nacional, 2019-B.
- [15] J. Ballesta y J. Boltimore, "PASSIVE OPTICAL NETWORK (PON): FEATURES AND BENEFITS," *RACC/S*, vol. 7, no. 2, pp. 4-9, 2017.
- [16] IEEE Standard for Ethernet Amendment 9: Physical Layer Specifications and Management Parameters for 25 Gb/s and 50 Gb/s Passive Optical Networks, IEEE Std 802.3ca™, 2020.
- [17] C. Knittle. (2020, Julio 23). 25G/50G-EPON Standard Crosses the Finish Line – Enhancing Fiber Deployments as Part of Cable’s 10G Platform [En línea]. Available: <https://www.cablelabs.com/25g-50g-epon-standard-crosses-the-finish-line-enhancing-fiber-deployments-as-part-of-cables-10g-platform>.
- [18] IEEE Standard for Information technology - Telecommunications and information exchange between systems - Local and metropolitan area networks - Specific requirements, Part 3: Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (CSMA/CD) Access Method and Physical Layer Specifications, Amendment 1: Physical Layer Specifications and Management Parameters for 10 Gb/s Passive Optical Networks, IEEE Std 802.3av™, 2009.
- [19] SERIES G: TRANSMISSION SYSTEMS AND MEDIA, DIGITAL SYSTEMS AND NETWORKS. Digital sections and digital line system - Optical line systems for local and access networks. 40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): General requirements, ITU-T G.989.1, 2013.
- [20] SERIES G: TRANSMISSION SYSTEMS AND MEDIA, DIGITAL SYSTEMS AND NETWORKS. Digital sections and digital line system - Optical line systems for local and access networks. 40-Gigabit-capable passive optical networks 2 (NG PON2): Physical media dependent (PMD) layer specification, ITU-T G.989.2, 2019.
- [21] SERIES G: TRANSMISSION SYSTEMS AND MEDIA, DIGITAL SYSTEMS AND NETWORKS. Digital sections and digital line system - Optical line systems for local and access networks. 40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): Definitions, abbreviations and acronyms, ITU-T G.989, 2015.
- [22] Anritsu. CPRI and OBSAI [En línea]. Available: <https://www.anritsu.com/en-us/test-measurement/technologies/cpri-and->

obsai#:~:text=BBUs%20and%20RRHs%20are%20connected,Station%20Architecture%20Initiative%20(OBSAI).

- [23] TELNET Redes Inteligentes. WaveCEX: WDM module for PON coexistence [En línea]. Available: <https://www.telnet-ri.es/en/wavecex-pon-coexistence-element/>.

5. ANEXOS

ANEXO I. Características de las fibras G.652.D y G.657.A

- Características de la fibra G.652.D

Fibre attributes			
Attribute	Detail	Value	Unit
Mode field diameter	Wavelength	1310	nm
	Range of nominal values	8.6-9.2	µm
	Tolerance	± 0.4	µm
Cladding diameter	Nominal	125.0	µm
	Tolerance	± 0.7	µm
Core concentricity error	Maximum	0.6	µm
Cladding noncircularity	Maximum	1.0	%
Cable cut-off wavelength	Maximum	1260	nm
Macrobending loss	Radius	30	mm
	Number of turns	100	
	Maximum at 1625 nm	0.1	dB
Proof stress	Minimum	0.69	GPa
Chromatic dispersion parameter	λ_{0min}	1300	nm
	λ_{0max}	1324	nm
3-term Sellmeier fitting (1260 nm to 1460 nm)	S_{0min}	0.073	ps/(nm ² × km)
	S_{0max}	0.092	ps/(nm ² × km)
Linear fitting (1460 nm to 1625 nm)	Minimum at 1550 nm	13.3	ps/(nm × km)
	Maximum at 1550 nm	18.6	ps/(nm × km)
	Minimum at 1625 nm	17.2	ps/(nm × km)
	Maximum at 1625 nm	23.7	ps/(nm × km)
Cable attributes			
Attribute	Detail	Value	Unit
Attenuation coefficient (Note 1)	Maximum from 1310 nm to 1625 nm (Note 2)	0.40	dB/km
	Maximum at 1383 nm ±3 nm after hydrogen ageing (Note 3)	0.40	dB/km
	Maximum at 1530-1565 nm	0.30	dB/km
PMD coefficient (Note 4,5)	M	20	cables
	Q	0.01	%
	Maximum PMD ₀	0.20	ps/√km
<p>NOTE 1 – The attenuation coefficient values listed in this table should not be applied to short cables such as jumper cables, indoor cables and drop cables. For example, [b-IEC 60794-2-11] specifies the attenuation coefficient of indoor cable as 1.0 dB/km or less at both 1310 and 1550 nm. Attenuation coefficient at a wavelength longer than 1625 nm (for monitoring purpose) is not well known. In general, the attenuation increases as the wavelength increases, and it may show steep wavelength dependence due to both macro- and microbending losses.</p> <p>NOTE 2 – This wavelength region can be extended to 1260 nm by adding 0.07 dB/km induced Rayleigh scattering loss to the attenuation value at 1310 nm.</p> <p>NOTE 3 – The hydrogen ageing is a type test that shall be done to a set of sampled fibres, according to [IEC 60793-2-50] regarding the B1.3 fibre category.</p> <p>NOTE 4 – According to clause 7.2, a maximum PMD₀ value on uncabled fibre is specified in order to support the primary requirement on cable PMD₀.</p> <p>NOTE 5 – Optical fibre cables with higher PMD coefficient can be used for systems with less stringent PMD requirements.</p>			

- Características de la fibra G.657.A

Fibre attributes							
Attribute	Detail	Value					Unit
Mode field diameter	Wavelength	1 310					nm
	Range of nominal values	8.6-9.2					μm
	Tolerance	± 0.4					μm
Cladding diameter	Nominal	125.0					μm
	Tolerance	± 0.7					μm
Core concentricity error	Maximum	0.5					μm
Cladding non-circularity	Maximum	1.0					%
Cable cut-off wavelength	Maximum	1 260					nm
Uncabled fibre macrobending loss (Notes 1, 2)		ITU-T G.657.A1		ITU-T G.657.A2			
	Radius	15	10	15	10	7.5	mm
	Number of turns	10	1	10	1	1	
	Max. at 1 550 nm	0.25	0.75	0.03	0.1	0.5	dB
	Max. at 1 625 nm	1.0	1.5	0.1	0.2	1.0	dB
ITU-T G.657 category A							
Proof stress	Minimum	0.69					GPa
Chromatic dispersion parameter 3-term Sellmeier fitting (1 260nm to 1 460 nm)	$\lambda_{0\text{min}}$	1 300					nm
	$\lambda_{0\text{max}}$	1 324					nm
	$S_{0\text{min}}$	0.073					ps/(nm ² × km)
	$S_{0\text{max}}$	0.092					ps/(nm ² × km)
Linear fitting (1 460 nm to 1 625 nm)	Min. at 1 550 nm	13.3					ps/(nm × km)
	Max. at 1 550 nm	18.6					ps/(nm × km)
	Min. at 1 625 nm	17.2					ps/(nm × km)
	Max. at 1 625 nm	23.7					ps/(nm × km)
Cable attributes							
Attenuation coefficient (Note 3)	Maximum from 1 310 nm to 1 625 nm (Note 4)		0.40			dB/km	
	Maximum at 1 383 nm \pm 3 nm after hydrogen ageing (Note 5)		0.40			dB/km	
	Maximum at 1 530–1 565 nm		0.30			dB/km	
PMD coefficient	M	20			cables		
	Q	0.01			%		
	Maximum PMD _Q	0.20			ps/km ^{0.5}		
<p>NOTE 1 – ITU-T G.652 fibres deployed at a radius of 15 mm generally can have macrobending losses of several dB per 10 turns at 1 625 nm.</p> <p>NOTE 2 – The macrobending loss can be evaluated using a mandrel winding method (method A of [IEC 60793-1-47]), substituting the bending radius and the number of turns specified in this table.</p> <p>NOTE 3 – Due to the lack of accuracy in measuring the attenuation coefficient of a short cable, its value can be taken from that of the original longer donor cable.</p> <p>NOTE 4 – This wavelength region can be extended to 1 260 nm by adding 0.07 dB/km induced Rayleigh scattering loss to the attenuation value at 1 310 nm.</p> <p>NOTE 5 – Hydrogen ageing is a type test that shall be done to a set of sampled fibres, according to [IEC 60793-2-50] regarding the B1.3 fibre category.</p>							

ANEXO II. Especificaciones ópticas para la transmisión y recepción de datos entre la subcapa PMD de 50G-EPON y su interfaz MDI

- Características de transmisión de una PMD de OLT con clase de ODN de potencia media

Parameter	25/10GBASE-PQG-D2 25/10GBASE-PQX-D2 25GBASE-PQG-D2 25GBASE-PQX-D2	50/10GBASE-PQG-D2 50/10GBASE-PQX-D2 50/25GBASE-PQG-D2 50/25GBASE-PQX-D2 50GBASE-PQG-D2 50GBASE-PQX-D2	Unit
Signaling rate (range)	25.78125 ± 100 ppm		GBd
Channel wavelength ranges	1356 to 1360	1356 to 1360 1340 to 1344	nm
Side-mode suppression ratio (SMSR) (min)	30		dB
Total average launch power (max)	—	8	dBm
Average launch power, each channel (max)	5		dBm
Optical Modulation Amplitude (OMA), each channel (min) ^a	2.6		dBm
Difference in launch power between any two channels (OMA) (max)	—	3	dB
Launch power in OMA minus TDP, each channel (min) ^b for extinction ratio ≥ 9 dB for extinction ratio < 9 dB	2 2.1		dBm dBm
Transmitter and dispersion penalty (TDP), each channel (max)	1.5		dB
Average launch power of OFF transmitter, each channel (max)	-39		dBm
Extinction ratio (min)	8		dB
RIN _{15OMA} (max)	-128		dB/Hz
Optical return loss tolerance (max)	15		dB
Transmitter reflectance ^c (max)	-10		dB
Transmitter eye mask definition {X1, X2, X3, Y1, Y2, Y3} ^d	{0.25, 0.4, 0.45, 0.25, 0.28, 0.4}		UI

^a Even if the TDP < 0.5 dB, the OMA (min) exceeds this value.

^b For reference, this implies that the minimum average launch power per channel at minimum extinction ratio and maximum TDP is 2 dBm. This minimum average launch power value is informative only.

^c Transmitter reflectance is defined looking into the transmitter.

^d As defined in Figure 86-4.

- Características de transmisión de una PMD de OLT con clase de ODN de potencia alta

Parameter	25/10GBASE-PQG-D3 25/10GBASE-PQX-D3 25GBASE-PQG-D3 25GBASE-PQX-D3	50/10GBASE-PQG-D3 50/10GBASE-PQX-D3 50/25GBASE-PQG-D3 50/25GBASE-PQX-D3 50GBASE-PQX-D3 50GBASE-PQG-D3	Unit
Signaling rate (range)	25.78125 ± 100 ppm		GBd
Channel wavelength ranges	1356 to 1360	1356 to 1360 1340 to 1344	nm
Side-mode suppression ratio (SMSR) (min)	30		dB
Total average launch power (max)	—	10.8	dBm
Average launch power, each channel (max)	7.8		dBm
Optical Modulation Amplitude (OMA), each channel (min) ^a	4.9		dBm
Difference in launch power between any two channels (OMA) (max)	—	3	dB
Launch power in OMA minus TDP, each channel (min) ^b for extinction ratio ≥ 9 dB	4.8		dBm
for extinction ratio < 9 dB	4.9		dBm
Transmitter and dispersion penalty (TDP), each channel (max)	1.5		dB
Average launch power of OFF transmitter, each channel (max)	-39		dBm
Extinction ratio (min)	8		dB
RIN _{15OMA} (max)	-128		dB/Hz
Optical return loss tolerance (max)	15		dB
Transmitter reflectance ^c (max)	-10		dB
Transmitter eye mask definition {X1, X2, X3, Y1, Y2, Y3} ^d	{0.25, 0.4, 0.45, 0.25, 0.28, 0.4}		UI

^a Even if the TDP < 0.5 dB, the OMA (min) exceeds this value.

^b For reference, this implies that the minimum average launch power per channel at minimum extinction ratio and maximum TDP is 4.8 dBm. This minimum average launch power value is informative only.

^c Transmitter reflectance is defined looking into the transmitter.

^d As defined in Figure 86-4.

- Características de recepción de una PMD de OLT con clase de ODN de potencia media

Parameter	25GBASE-PQG-D2 5025GBASE-PQG-D2		25GBASE-PQX-D2 5025GBASE-PQX-D2		50GBASE-PQG-D2		50GBASE-PQX-D2		25/10GBASE-PQG-D2 50/10GBASE-PQG-D2		25/10GBASE-PQX-D2 50/10GBASE-PQX-D2		Unit
Signaling rate (range)	25.78125 ± 100 ppm								See Table 75-6 ^a				Gbd
Channel wavelengths (range)	1260 to 1280	1290 to 1310	1260 to 1280 1290 to 1310	1290 to 1310 1318 to 1322	See Table 75-6 ^a		1290 to 1310						nm
Bit error ratio (max) ^b	10 ⁻²												—
Damage threshold ^c	-2												dBm
Average receive power, each channel (max)	-3												dBm
Receiver reflectance (max)	-12												dB
Receiver sensitivity (OMA), each channel ^d (max)	-22.7												dBm
Signal detect threshold, each channel (min)	-40												dBm
Stressed receiver sensitivity (OMA), each channel ^e (max)	-21.2												dBm
Receiver settling time (max)	800												ns
Conditions of stressed receiver sensitivity test													
Vertical eye closure penalty, ^f each channel	2								See Table 75-6 ^a				dB
Stressed eye J2 Jitter, ^{e,f} each channel	0.3								—				UI
Stressed eye J9 Jitter, ^{e,f} each channel	0.47								—				UI

^a Individual 10G-EPON PMD parameters are reused without change at a higher pre-FEC bit error ratio shown in Table 141-17.

^b The BER of 10⁻¹² is achieved by the utilization of FEC as described in 142.2.4.1.

^c The receiver tolerates, without damage, continuous exposure to an optical input signal having this average power level.

^d Receiver sensitivity (OMA), each channel (max) is informative and is defined for a transmitter with VECP = 0.5 dB. For reference, this implies that the maximum average power unstressed receiver sensitivity measured with an ideal transmitter signal at minimum extinction ratio is -22 dBm. This value is informative only.

^e Measured with conformance test signal at TP3 (see 141.7.11) for BER = 10⁻².

^f Vertical eye closure penalty, stressed eye J2 Jitter, and stressed eye J9 Jitter are test conditions for measuring stressed receiver sensitivity. They are not characteristics of the receiver.

- Características de recepción de una PMD de OLT con clase de ODN de potencia alta

Parameter	25GBASE-PQG-D3 5025GBASE-PQG-D3	25GBASE-PQX-D3 5025GBASE-PQX-D3	50GBASE-PQG-D3	50GBASE-PQX-D3	2510GBASE-PQG-D3 5010GBASE-PQG-D3	2510GBASE-PQX-D3 5010GBASE-PQX-D3	Unit
Signaling rate (range)	25,78125 ± 100 ppm				See Table 75-6 ^a		GBd
Channel wavelength ranges	1260 to 1280	1290 to 1310	1260 to 1280 1290 to 1310	1290 to 1310 1318 to 1322	See Table 75-6 ^a	1290 to 1310	nm
Bit error ratio (max) ^b	10 ⁻²						—
Damage threshold ^c	-5				See Table 75-6 ^a		dBm
Average receive power, each channel (max)	-6				—		dBm
Receiver reflectance (max)	-12				See Table 75-6 ^a		dB
Receiver sensitivity (OMA), each channel ^d (max)	-24.3						dBm
Signal detect threshold, each channel (min)	-40						dBm
Stressed receiver sensitivity (OMA), each channel ^e (max)	-22.8						dBm
Receiver settling time (max)	800						ns
Conditions of stressed receiver sensitivity test							
Vertical eye closure penalty, ^f each channel	2				See Table 75-6 ^a		dB
Stressed eye J2 Jitter, ^{e,f} each channel	0.3				—		UI
Stressed eye J9 Jitter, ^{e,f} each channel	0.47				—		UI

^a Individual 10G-EPON PMD parameters are reused without change at a higher pre-FEC bit error ratio shown in Table 141-17.

^b The BER of 10⁻¹² is achieved by the utilization of FEC as described in 142.2.4.1.

^c The receiver tolerates, without damage, continuous exposure to an optical input signal having this average power level. Direct ONU-OLT connection may result in damage of the receiver.

^d Receiver sensitivity (OMA) is measured with a signal with VECP = 0.5 dB and is informative. For reference, this implies that the maximum average power unstressed receiver sensitivity measured with an ideal transmitter signal at minimum extinction ratio is -25 dBm. This value is informative only.

^e Measured with conformance test signal at TP7 (see 141.7.11) for BER = 10⁻².

^f Vertical eye closure penalty, stressed eye J2 Jitter, and stressed eye J9 Jitter are test conditions for measuring stressed receiver sensitivity. They are not characteristics of the receiver.

- Características de transmisión de una PMD de ONU con clase de ODN de potencia media

Parameter	25GBASE-PQG-U2 5025GBASE-PQG-U2		25GBASE-PQX-U2 5025GBASE-PQX-U2		50GBASE-PQG-U2		50GBASE-PQX-U2		Unit
	25/100GBASE-PQG-U2 50/100GBASE-PQG-U2 25/100GBASE-PQX-U2 50/100GBASE-PQX-U2								
Signaling rate (range)	25.78125 ± 100 ppm								GBd
Channel wavelengths (range)	1260 to 1280	1290 to 1310	1260 to 1280 1290 to 1310	1290 to 1310 1318 to 1322					nm
Side-mode suppression ratio (SMSR) (min)	30								dB
Total average launch power (max)	—				10				dBm
Average launch power, each channel (max)	7								dBm
Optical Modulation Amplitude (OMA), each channel (min) ^a	1.3								dBm
Difference in launch power between any two channels (OMA) (max)	—				3				dB
Launch power in OMA minus TDP, each channel (min) ^b for extinction ratio ≥ 5.5 dB for extinction ratio ≥ 4.5 dB for extinction ratio < 4.5 dB					0.2 0.5 0.8				dBm
Transmitter and dispersion penalty (TDP), each channel (max)	2								dB
Average launch power of OFF transmitter, each channel (max)	-45								dBm
Extinction ratio (min)	3.5								dB
RIN _{15OMA} (max)	-128								dB/Hz
Optical return loss tolerance (max)	15								dB
Transmitter reflectance ^c (max)	-10								dB
Transmitter eye mask definition {X1, X2, X3, Y1, Y2, Y3} ^d	{0.31, 0.4, 0.45, 0.34, 0.38, 0.4}								UI
Turn-on time (max)	128								ns
Turn-off time (max)	128								ns

^a Even if the TDP < 0.5 dB, the OMA (min) exceeds this value.

^b For reference, this implies that the minimum average launch power per channel at minimum extinction ratio and maximum TDP is 4 dBm. This minimum average launch power value is informative only.

^c Transmitter reflectance is defined looking into the transmitter.

^d As defined in Figure 86-4.

- Características de transmisión de una PMD de ONU con clase de ODN de potencia alta

Parameter	25GBASE-PQG-U3 5025GBASE-PQG-U3	25GBASE-PQX-U3 5025GBASE-PQX-U3	50GBASE-PQ22G-U3	50GBASE-PQ22X-U3	Unit
Signaling rate (range)	25.78125 ± 100 ppm				GBd
Channel wavelength ranges	1260 to 1280	1290 to 1310	1260 to 1280 1290 to 1310	1290 to 1310 1318 to 1322	nm
Side-mode suppression ratio (SMSR) (min)	30				dB
Total average launch power (max)	—		12		dBm
Average launch power, each channel (max)	9				dBm
Optical Modulation Amplitude (OMA), each channel (min) ^a	4.7				dBm
Difference in launch power between any two channels (OMA) (max)	—		3		dB
Launch power in OMA minus TDP, each channel (min) ^b for extinction ratio ≥ 6 dB for extinction ratio < 6 dB	4 4.2				dBm
Transmitter and dispersion penalty (TDP), each channel (max)	2				dB
Average launch power of OFF transmitter, each channel (max)	-45				dBm
Extinction ratio (min)	5				dB
RIN ₁₅ OMA (max)	-128				dB/Hz
Optical return loss tolerance (max)	15				dB
Transmitter reflectance ^c (max)	-10				dB
Transmitter eye mask definition {X1, X2, X3, Y1, Y2, Y3} ^d	{0.31, 0.4, 0.45, 0.34, 0.38, 0.4}				UI
Turn-on time (max)	128				ns
Turn-off time (max)	128				ns

^a Even if the TDP < 0.5 dB, the OMA (min) exceeds this value.

^b For reference, this implies that the minimum average launch power per channel at minimum extinction ratio and maximum TDP is 6 dBm. This minimum average launch power value is informative only.

^c Transmitter reflectance is defined looking into the transmitter.

^d As defined in Figure 86-4.

- Características de recepción de una PMD de ONU con clase de ODN de potencia media

Parameter	25/10GBASE-PQG-U2 25/10GBASE-PQX-U2 25GBASE-PQG-U2 25GBASE-PQX-U2		Unit
	50/10GBASE-PQG-U2 50/10GBASE-PQX-U2 50/25GBASE-PQG-U2 50/25GBASE-PQX-U2 50GBASE-PQX-U2 50GBASE-PQG-U2		
Signaling rate (range)	25.78125 ± 100 ppm		GBd
Channel wavelengths (range)	1356 to 1360	1356 to 1360 1340 to 1344	nm
Bit error ratio (max) ^a	10 ⁻²		—
Damage threshold ^b	-4		dBm
Average receive power, each channel (max)	-5		dBm
Receiver reflectance (max)	-12		dB
Receiver sensitivity (OMA), each channel ^c (max)	-21.4		dBm
Detect threshold, each channel (min)	-40		dBm
Stressed receiver sensitivity (OMA), each channel ^d (max)	-20.4		dBm
Conditions of stressed receiver sensitivity test			
Vertical eye closure penalty, ^e each channel	1.5		dB
Stressed eye J2 Jitter, ^e each channel	0.3		UI
Stressed eye J9 Jitter, ^e each channel	0.47		UI

^a The BER of 10⁻¹² is achieved by the utilization of FEC as described in 142.2.4.1.

^b The receiver tolerates, without damage, continuous exposure to an optical input signal having this average power level.

^c Receiver sensitivity (OMA), each channel (max) is informative and is defined for a transmitter with VECP = 0.5 dB. For reference, this implies that the maximum average power unstressed receiver sensitivity measured with an ideal transmitter signal at minimum extinction ratio is -23.5 dBm. This value is informative only.

^d Measured with conformance test signal at TP3 (see 141.7.11) for BER = 10⁻².

^e Vertical eye closure penalty, stressed eye J2 Jitter, and stressed eye J9 Jitter are test conditions for measuring stressed receiver sensitivity. They are not characteristics of the receiver.

- Características de recepción de una PMD de ONU con clase de ODN de potencia alta

Parameter	25/10GBASE-PQG-U3 25/10GBASE-PQX-U3 25GBASE-PQG-U3 25GBASE-PQX-U3	50/10GBASE-PQG-U3 50/10GBASE-PQX-U3 50/25GBASE-PQG-U3 50/25GBASE-PQX-U3 50GBASE-PQX-U3 50GBASE-PQG-U3	Unit
	Channel wavelength ranges	1356 to 1360	
Signaling rate (range)	25.78125 ± 100 ppm		GBd
Bit error ratio (max) ^a	10 ⁻²		—
Damage threshold ^b	-6.2		dBm
Average receive power, each channel (max)	-7.2		dBm
Receiver reflectance (max)	-12		dB
Receiver sensitivity (OMA), each channel ^c (max)	-24.1		dBm
Detect threshold, each channel (min)	-40		dBm
Stressed receiver sensitivity (OMA), each channel ^d (max)	-22.6		dBm
Conditions of stressed receiver sensitivity test			
Vertical eye closure penalty, ^e each channel	1.5		dB
Stressed eye J2 Jitter, ^e each channel	0.3		UI
Stressed eye J9 Jitter, ^e each channel	0.47		UI

^a The BER of 10⁻¹² is achieved by the utilization of FEC as described in 142.2.4.1.

^b The receiver tolerates, without damage, continuous exposure to an optical input signal having this average power level. Direct ONU-OLT connection may result in damage of the receiver.

^c Receiver sensitivity (OMA), each channel (max) is informative.

^d Measured with conformance test signal at TP3 (see 141.7.11) for BER = 10⁻².

^e Vertical eye closure penalty, stressed eye J2 Jitter, and stressed eye J9 Jitter are test conditions for measuring stressed receiver sensitivity. They are not characteristics of the receiver.

ANEXO III. Parámetros de la interfaz óptica de la subcapa PMD de NG-PON2 (TWDM)

- Parámetros de la interfaz óptica a 2.48832Gbps en sentido descendente

Item	Unit	Value			
OLT transmitter (optical interface S)					
Nominal line rate	Gbit/s	2.48832 (Note 1)			
Operating wavelength band	nm	1596-1603			
Operating central frequency	THz	Table 11-2			
Operating channel spacing	GHz	100 (Note 2)			
Maximum spectral excursion	GHz	+/-20			
Line code	-	Scrambled NRZ (Note 1)			
Mask of the transmitter eye diagram	-	See clause 11.1.5.3			
Maximum reflectance of equipment at S/R-CG, measured at transmitter wavelength	dB	NA			
Minimum ORL of ODN at S/R-CG	dB	32			
ODN class		N1	N2	E1	E2
Mean channel launch power minimum (at S/R-CG)	dBm	+0.0	+2.0	+4.0	+6.0
Mean channel launch power maximum (at S/R-CG)	dBm	+4.0	+6.0	+8.0	+10
Maximum downstream WNE-PSD	dBm (15 GHz)	-63.5			
Minimum extinction ratio (Note 3)	dB	8.2			
Tolerance to reflected optical power	dB	-15			
Dispersion range	ps/nm	0-420 (DD20) 0-840 (DD40)			
Minimum side mode suppression ratio (at S/R-CP)	dB	30			
Maximum downstream per channel out-of-band optical PSD (Note 4)	dBm (15 GHz)	-44.9 (4 channels)			
		-52.1 (8 channels)			
Maximum downstream per channel out-of-channel optical PSD (Note 5)	dBm (15 GHz)	-34.5 (4 channels)			
		-42.4 (8 channels)			
Jitter generation	-	See clause 11.1.5.4.3			
ONU receiver (optical interface R)					
Maximum OPP (Note 6)	dB	1.0			
Maximum reflectance of equipment at R/S, measured at receiver wavelength	dB	-20			
Bit error ratio reference level	-	10 ⁻⁴ (Note 7)			
Rx wavelength channel tuning time		See Table 9-2			
Maximum tuning granularity	GHz	5			
ODN class		N1	N2	E1	E2
Sensitivity (at R/S)	dBm	-30.0	-30.0	-30.0	-30.0
Overload (at R/S)	dBm	-10.0	-10.0	-10.0	-10.0
In-band crosstalk tolerance	dB (15 GHz)	32.3			
Consecutive identical digit immunity	bit	72			
Jitter tolerance	-	See clause 11.1.5.4.2			

NOTE 1 – Two additional line codes that have been developed to facilitate support of the RF Video Overlay are covered in Appendix IX.

NOTE 2 – Minor deviations from the nominal 100 GHz spacing are allowed in order to accommodate a combined wavelength mux/demux device, see Table 11-2.

NOTE 3 – A lower extinction ratio is allowed but must be compensated by a larger transmitter launch power within the limits of the "Mean launch power maximum" value. However, the impact of reduced ER on OOB/OOC power must be considered.

NOTE 4 – This value is based on the following assumptions: OOB impact from TWDM PON on PtP WDM PON can be controlled through appropriate filtering, 0.1 dB penalty, PtP WDM PON operates without FEC, and 4 or 8 interfering TWDM channels, respectively.

NOTE 5 – This value is based on the following assumptions: OOC in downstream can be controlled through filtering from WM, 0.1 dB penalty, TWDM PON operates with FEC, and 4 or 8 TWDM channels (three or seven interferers), respectively.

NOTE 6 – The specified OPP is valid up to a 40 km optical link distance. If the actual OPP is worse than the specified value, it must be compensated by the transmitter launch power increase up to the limits of the Mean launch power maximum.

NOTE 7 – See clause 9.4.1 of [b-ITU-T G.Sup39] for additional details.

NOTE 8 – The definition of In-band crosstalk tolerance and its implication on receiver sensitivity is defined in clause 3.2.2.10 of [ITU-T G.989].

- Parámetros de la interfaz óptica a 9.95328Gbps en sentido descendente

Item	Unit	Value			
OLT transmitter (optical interface S)					
Nominal line rate	Gbit/s	9.95328 (Note 1)			
Operating wavelength band	nm	1596-1603			
Operating central frequency	THz	Table 11-2			
Operating channel spacing	GHz	100 (Note 2)			
Maximum spectral excursion	GHz	+/-20			
Line code	–	Scrambled NRZ (Note 1)			
Mask of the transmitter eye diagram	–	See clause 11.1.5.3			
Maximum reflectance of equipment at S/R-CG, measured at transmitter wavelength	dB	NA			
Minimum ORL of ODN at S/R-CG	dB	32			
ODN Class		N1	N2	E1	E2
Mean channel launch power minimum (at S/R-CG)	dBm	+3.0	+5.0	+7.0	+9.0
Mean channel launch power maximum (at S/R-CG)	dBm	+7.0	+9.0	+11.0	+11.0
Maximum downstream WNE-PSD (15 GHz)	dBm	-63.7			
Minimum extinction ratio (Note 3)	dB	8.2			
Tolerance to reflected optical power	dB	-15			
Dispersion range	ps/nm	0.420 (DD20) 0.840 (DD40)			
Minimum side mode suppression ratio (at S/R-CP)	dB	30			
Maximum downstream per channel out-of-band optical PSD (Note 4)	dBm (15 GHz)	-44.9 (4 channels)			
		-52.1 (8 channels)			
Maximum downstream per channel out-of-channel optical PSD (Note 5)	dBm (15 GHz)	-34.5 (4 channels)			
		-42.4 (8 channels)			
Jitter generation	–	See clause 11.1.5.4.3			
ONU receiver (optical interface R)					
Maximum OPP (Note 6)	dB	2.0			
Maximum reflectance of equipment at R/S, measured at receiver wavelength	dB	-20			
Bit error ratio reference level	–	10 ⁻³ (Note 7)			
Rx wavelength channel tuning time		See Table 9-2			
Maximum tuning granularity	GHz	5			
ODN Class		N1	N2	E1	E2
Sensitivity (at R/S)	dBm	-28.0	-28.0	-28.0	-28.0
Overload (at R/S)	dBm	-7.0	-7.0	-7.0	-9.0
Item	Unit	Value			
	(15 GHz)				
Consecutive identical digit immunity	bit	72			
Jitter tolerance	–	See clause 11.1.5.4.2			
NOTE 1 – Two additional line codes that have been developed to facilitate support of the RF video overlay are covered in Appendix IX.					
NOTE 2 – Minor deviations from the nominal 100 GHz spacing are allowed in order to accommodate a combined wavelength mux/demux, see Table 11-2.					
NOTE 3 – A lower extinction ratio is allowed but must be compensated by a larger transmitter launch power within the limits of the "Mean launch power maximum" value. However, the impact of reduced ER on OOB/OOC power must be considered.					
NOTE 4 – This value is based on the following assumptions: OOB impact from TWDM PON on PtP WDM PON can be controlled through appropriate filtering, 0.1 dB penalty, PtP WDM PON operates without FEC, and 4 or 8 interfering TWDM channels, respectively.					
NOTE 5 – This value is based on the following assumptions: OOC in downstream can be controlled through filtering from WM, 0.1 dB penalty, TWDM PON operates with FEC, and 4 or 8 TWDM channels (three or seven interferers), respectively.					
NOTE 6 – The specified OPP is valid up to a 40 km optical link distance. If the actual OPP is worse than the specified value, it must be compensated by the transmitter launch power increase up to the limits of the Mean launch power maximum.					
NOTE 7 – See clause 9.4.1 of [b-ITU-T G.Su39], for additional details.					
NOTE 8 – The definition of In-band crosstalk tolerance and its implication on receiver sensitivity is defined in clause 3.2.2.10 of [ITU-T G.989].					

- Parámetros de la interfaz óptica a 2.48832Gbps en sentido ascendente

Item	Unit	Value			
ONU transmitter (optical interface S)					
Nominal line rate	Gbit/s	2.48832			
Operating wavelength band	nm	1524-1544 (wide band option), 1528-1540 (reduced band option) 1532-1540 (narrow band option)			
Minimum operating channel spacing	GHz	50			
Maximum operating channel spacing	GHz	200			
Maximum spectral excursion (over 1 OLT-ONU tuning cycle) (Note 1)	GHz	+/-12.5 (for 50 GHz CS) +/-20 (for 100 GHz CS) +/-25 (for 200 GHz CS)			
Transmitter power wavelength dependency (Note 13)	dB	+/-0.05 dB/GHz			
Minimum tuning window (Note 2) When using cyclic channel grid When not using cyclic channel grid	GHz	(N+1)*CS (N-1)*CS+2*MSE			
Maximum tuning granularity	GHz	CS/20			
Tx wavelength channel tuning time		See Table 9-2			
Line code	-	Scrambled NRZ			
Mask of the transmitter eye diagram	-	See clause 11.1.5.3.2			
Maximum reflectance of equipment at R/S, measured at transmitter wavelength (Note 19)	dB	-32			
Minimum ORL of ODN at R/S	dB	32			
ODN Class		N1	N2	E1	E2
Mean channel launch power minimum (at R/S)					
- Type A link (Note 3)	dBm	+4	+4	+4	+4
- Type B link (Note 4)	dBm	0	0	0	0
Mean channel launch power maximum (at R/S) (Note 14)					
- Type A link (Note 3)	dBm	+9	+9	+9	+9
- Type B link (Note 4)	dBm	+5	+5	+5	+5
Maximum Tx enable transient time	bits	320 (128.6)			
Maximum Tx disable transient time	bits	320 (128.6)			
Minimum extinction ratio (Note 5)	dB	8.2			
Tolerance to reflected optical power	dB	-15			
Dispersion range	ps/nm	0 to 355 (DD20) 0 to 710 (DD40)			
Minimum side mode suppression ratio (Note 6)	dB	30			
Maximum upstream out-of-band optical PSD (Note 7)	dBm (15GHz)	-57.4 (4 channels) -64.6 (8 channels)			
Maximum upstream out-of-channel optical PSD - OOC1 (Note 8)	dBm (15 GHz)	-36.7 for 50GHz CS -40.5 for 100 GHz CS -44.4 for 200 GHz CS			
Maximum upstream out-of-channel optical PSD - OOC2 (Note 8)	dBm (15 GHz)	-41.6 (4 channels) -48.8 (8 channels)			
Maximum upstream WNE-PSD (Note 9)	dBm (15 GHz)	-62.6			
Jitter transfer	-	See clause 11.1.5.4.1			
Jitter generation	-	See clause 11.1.5.4.3			
OLT receiver (optical interface R)					
ODN class		N1	N2	E1	E2
Maximum OPP (Note 10)	dB				
- with Raman effects (DD20, 4 channel) (Note 15)		1.0	1.0	1.5	1.5
- with Raman effects (DD40, 4 channel)		1.4	1.6	1.9	1.9
- with Raman effects (DD20, 8 channel)		1.0	1.3	1.8	1.8
- with Raman effects (DD40, 8 channel)		1.7	2.1	2.8	2.8

Maximum OPP excluding Raman (Note 17)	dB				
– DD20		0.5			
– DD40		1.0			
Maximum reflectance of equipment at S/R-CG, measured at receiver wavelength	dB	–20			
Bit error ratio reference level	–	10^{-4} (Note 11)			
ODN class		N1	N2	E1	E2
Sensitivity (at S/R-CG, based on DD20, 4 channel) (Note 12)					
– Type A link (Note 3)	dBm	–26	–28	–30.5	–32.5
– Type B link (Note 4)	dBm	–30	–32	–34.5	–36.5
Overload (at S/R-CG)					
– Type A link (Note 3)	dBm	–5	–7	–9	–11
– Type B link (Note 4)	dBm	–9	–11	–13	–15
In-band crosstalk tolerance (Type A) (Note 18)	dB	26.0	26.0	25.1	24.1
(Type B)	(15 GHz)	22.0	22.0	21.1	20.1
Consecutive identical digit immunity	bit	72			
Jitter tolerance	–	See clause 11.1.5.4.2			

NOTE 1 – MSE values of other CS can be interpolated from the three given values.

NOTE 2 – N is the channel count. When using cyclic channel grid, if CS is 100 GHz, the minimum tuning windows are 500 GHz and 900 GHz for four and eight channel TWDM PONs, respectively. When using cyclic channel grid, if CS is 50 GHz, the minimum tuning windows are 250 GHz and 450 GHz for four and eight channel TWDM PONs, respectively. When not using cyclic channel grid, if CS is 100 GHz, its minimum tuning windows are 340 GHz and 740 GHz for four and eight channel TWDM PONs, respectively. When not using cyclic channel grid, if CS is 50 GHz, the minimum tuning windows are 175 GHz and 375 GHz for 4 and 8 channel TWDM PONs, respectively.

NOTE 3 – Type A link values assume an unamplified OLT receiver. However, an amplified OLT receiver is not precluded.

NOTE 4 – Type B link values assume an amplified OLT receiver with the amplifier at the S/R-CG reference point. However, other amplifier approaches, including an unamplified OLT receiver are not precluded.

NOTE 5 – A lower extinction ratio is allowed but must be compensated by a larger transmitter launch power within the limits of the "Mean launch power maximum" value. However, the impact of reduced ER on OOB/OOC power must be considered.

NOTE 6 – SMSR is measured on the laser output, before any filtering. This prevents a significant mode partition noise penalty. Other limitations on OOB and OOC PSD still apply to the R/S reference point.

NOTE 7 – This value is based on the following assumptions: OOB impact from TWDM PON on PtP WDM PON can be controlled through appropriate filtering, 0.1 dB penalty, PtP WDM PON operates without FEC, and four or eight interfering TWDM channels, respectively.

NOTE 8 – See OOC-PSD mask in clause 9.3.9. These values are based on the following assumptions: 1 dB US OOC penalty, TWDM PON operates with FEC, and four or eight TWDM channels (three or seven interferers), respectively. In some implementations, this requirement may be achieved by more tightly regulating the Tx output power (lowering the maximum level while maintaining the minimum level).

NOTE 9 – This value is based on the following assumptions: 0.1 dB penalty, TWDM PON operates with FEC, and 64 TWDM PON ONUs in one channel (63 interferers).

NOTE 10 – The specified penalty takes into account the class-specific Tx power, distance, and number of wavelengths. The maximum OPP values assume no SR-/CG located splitters and low optical fibre loss, resulting in the worst case Raman effect. ODNs that include high loss elements near the OLT or higher loss optical cable will exhibit lower penalties.

NOTE 11 – See clause 9.4.1 of [ITU-T G.Sup39] for additional details.

NOTE 12 – See clause 11.1.4.3.1 for an approach to accommodate the case of 40 km and 8 wavelengths.

NOTE 13 – This parameter is applicable for ONU transmitters that require OLT interaction to tune the transmitting wavelength.

NOTE 14 – An optical power levelling mechanism can be applied to the ONU in order to help meet the OOB/OOC PSD and OLT Rx overload parameters. The concept of optical power levelling is described in Annex D.

NOTE 15 – The 4 channel, DD20 values are rounded up from those actually calculated.

NOTE 16 – The definition of In-band crosstalk tolerance and its implication on receiver sensitivity is defined in clause 3.2.2.10 of [ITU-T G.989].

NOTE 17 – If the actual OPP is worse than the specified value, it must be compensated by increasing the transmitter mean launch power minimum specification by X dB for each X dB of extra OPP allowance, where $X < 1.5$ dB, while meeting all other Tx specifications. High penalty operation poses some risks, and PMD interoperability testing should be employed to measure the actual OPP with a receiver subject to in-band crosstalk as specified elsewhere in this table. To avoid system operation in very high penalty regimes, this note is only applicable to the DD20 fibre distance class.

NOTE 18 – These values vary for each budget class based on the worst case combination of PtP WDM PON OOB, TWDM PON OOC, TWDM PON WNE-PSD and TWDM PON upstream ONU echoes (accounting for the maximum ODN split that can be obtained in each optical path loss class).

NOTE 19 – This value is based on the following assumptions: consideration of multiple upstream ONU echoes and penalties of 0.4 dB (for N1) up to 0.8 dB (for E2).

- Parámetros de la interfaz óptica a 9.95328Gbps en sentido ascendente

Item	Unit	Value			
ONU transmitter (optical interface S)					
Nominal line rate	Gbit/s	9.95328			
Operating wavelength band	nm	1524-1544 (wide band option), 1528-1540 (reduced band option) 1532-1540 (narrow band option)			
Minimum operating channel spacing	GHz	50			
Maximum operating channel spacing	GHz	200			
Maximum spectral excursion (Note 1) (over 1 OLT-ONU tuning cycle)	GHz	+/-12.5 (for 50 GHz CS) +/-20 (for 100 GHz CS) +/-25 (for 200 GHz CS)			
Transmitter power wavelength dependency (Note 13)	dB	+/-0.02 dB/GHz			
Minimum tuning window (Note 2) When using cyclic channel grid When not using cyclic channel grid	GHz	(N+1)*CS (N-1)*CS+2*MSE			
Maximum tuning granularity	GHz	CS/20			
Tx wavelength channel tuning time		See Table 9-2			
Line code	-	Scrambled NRZ (20 km) Scrambled NRZ (40 km) (Note 15)			
Mask of the transmitter eye diagram	-	See clause 11.1.5.3.2			
Maximum reflectance of equipment at R/S, measured at transmitter wavelength (Note 20)	dB	-32			
Minimum ORL of ODN at R/S	dB	32			
ODN Class		N1	N2	E1	E2
Mean channel launch power minimum (at R/S)					
- Type A link (Note 3)	dBm	+4.0	+4.0	+4.0	NA
- Type B link (Note 4)	dBm	+2.0	+2.0	+2.0	+4.0
Mean channel launch power maximum (at R/S) (Note 14)					
- Type A link (Note 3)	dBm	+9.0	+9.0	+9.0	NA
- Type B link (Note 4)	dBm	+7.0	+7.0	+7.0	+9.0
Maximum Tx enable transient time	Bits (ns)	1280 (128.6)			
Maximum Tx disable transient time	Bits (ns)	1280 (128.6)			
Minimum extinction ratio (Note 5)	dB	6.0			
Tolerance to reflected optical power	dB	-15			
Dispersion range	ps/nm	0 to 355 (DD20)			
Minimum side mode suppression ratio (Note 6)	dB	30			
Maximum upstream out-of-band optical PSD (Note 7)	dBm (15 GHz)	-57.4 (4 channels) -64.6 (8 channels)			
Maximum upstream out-of-channel optical PSD – OOC1 (Note 8)	dBm (15 GHz)	-36.7 for 50GHz CS -40.5 for 100 GHz CS -44.4 for 200 GHz CS			
Maximum upstream out-of-channel optical PSD – OOC2 (Note 8)	dBm (15 GHz)	-41.6 (4 channels) -48.5 (8 channels)			
Maximum upstream WNE-PSD (Note 9)	dBm (15 GHz)	-62.6			
Jitter transfer	-	See clause 11.1.5.4.1			
Jitter generation	-	See clause 11.1.5.4.3			
OLT receiver (optical interface R)					
ODN Class		N1	N2	E1	E2
Maximum OPP (Note 10, 15) - with Raman effects (DD20, 4 channel) (Note 16) - with Raman effects (DD40, 4 channel) - with Raman effects (DD20, 8 channel) - with Raman effects (DD40, 8 channel)	dB	1.0 1.9 1.0 2.2	1.0 2.1 1.3 2.6	1.5 2.4 1.8 3.3	1.5 2.4 1.8 3.3
Maximum OPP excluding Raman (Note 18) - DD20 - DD40	dB	0.5 1.5			

Maximum reflectance of equipment at S/R-CG, measured at receiver wavelength	dB	Less than -20			
Bit error ratio reference level	-	10 ⁻³ (Note 11)			
ODN Class		N1	N2	E1	E2
Sensitivity (at S/R-CG) , based on DD20, 4 channel) (Note 5 and Note 12)					
- Type A link (Note 3)	dBm	-26.0	-28.0	-30.5	NA
- Type B link (Note 4)	dBm	-28.0	-30.0	-32.5	-32.5
Overload (at S/R-CG)					
- Type A link (Note 3)	dBm	-5.0	-7.0	-9.0	NA
- Type B link (Note 4)	dBm	-7.0	-9.0	-11.0	-11.0
In-band crosstalk tolerance (Type A) (Note 19)	dB	26.0	26.0	25.1	24.1
(Type B)	(15 GHz)	24.0	24.0	23.1	22.1
Consecutive identical digit immunity	bit	72			
Jitter tolerance	-	See clause 11.1.5.4.2			
<p>NOTE 1 – MSE values of other CS can be interpolated from the three given values.</p> <p>NOTE 2 – N is the channel count. When using cyclic channel grid, if CS is 100 GHz, the minimum tuning windows are 500 GHz and 900 GHz for 4 and 8 channel TWDM PONs, respectively. When using cyclic channel grid, if CS is 50 GHz, the minimum tuning windows are 250 GHz and 450 GHz for four and eight channel TWDM PONs, respectively. When not using cyclic channel grid, if CS is 100 GHz, its minimum tuning windows are 340 GHz and 740 GHz for four and eight channel TWDM PONs, respectively. When not using cyclic channel grid, if CS is 50 GHz, the minimum tuning windows are 175 GHz and 375 GHz for 4 and 8 channel TWDM PONs, respectively.</p> <p>NOTE 3 – Type A link values assume an unamplified OLT receiver. However, an amplified OLT receiver is not precluded.</p> <p>NOTE 4 – Type B link values assume an amplified OLT receiver with the amplifier at the S/R-CG reference point. However, other amplifier approaches, including an unamplified OLT receiver are not precluded.</p> <p>NOTE 5 – A lower extinction ratio is allowed but must be compensated by a larger transmitter launch power within the limits of the "Mean launch power maximum" value. However the impact of reduced ER on OOB/OOC power must be considered. A lower "Mean launch power minimum" is allowed but must be compensated by higher extinction ratio. For quantitative treatment of these tradeoffs, see clause 11.1.4.3.2.</p> <p>NOTE 6 – SMSR is measured on the laser output, before any filtering. This prevents a significant mode partition noise penalty. Other limitations on OOB and OOC PSD still apply to the R/S reference point.</p> <p>NOTE 7 – This value is based on the following assumptions: OOB impact from TWDM PON on PtP WDM PON can be controlled through appropriate filtering, 0.1 dB penalty, PtP WDM PON operates without FEC, and four or eight interfering TWDM channels, respectively.</p> <p>NOTE 8 – See OOC-PSD mask in clause 9.3.9. These values are based on the following assumptions: 1 dB US OOC penalty, TWDM PON operates with FEC, and four or eight TWDM channels (three or seven interferers), respectively. In some implementations, this requirement may be achieved by more tightly regulating the Tx output power (lowering the maximum level while maintaining the minimum level).</p> <p>NOTE 9 – This value is based on the following assumptions: 0.1 dB penalty, TWDM PON operates with FEC, and 64 TWDM PON ONUs in one channel (63 interferers).</p> <p>NOTE 10 – The specified penalty takes into account the class-specific Tx power, distance, and number of wavelengths. The maximum OPP values assume no SR-/CG located based splitters and low optical fibre loss, resulting in the worst case Raman effect. ODNs that include high loss elements near the OLT or higher loss optical cable will exhibit lower penalties.</p> <p>NOTE 11 – See clause 9.4.1 [b-ITU-T G.Supp39] for additional details.</p> <p>NOTE 12 – See clause 11.1.4.3.1 for an approach to accommodate the case of 40 km and eight wavelengths.</p> <p>NOTE 13 – This parameter is applicable for ONU transmitters that require OLT interaction to tune the transmitting wavelength.</p> <p>NOTE 14 – An optical power levelling mechanism can be applied to the ONU in order to help meet the OOB/OOC PSD and OLT Rx overload parameters. The concept of optical power levelling is described in Annex D.</p> <p>NOTE 15 – Scrambled NRZ is assumed for the OPP parameter values. Other coding schemes for 40 km may result in lower OPPs with alternative transmitter technologies. These other coding schemes are for further study.</p> <p>NOTE 16 – The 4 channel, DD20 values are rounded up from those actually calculated.</p> <p>NOTE 17 – The definition of In-band crosstalk tolerance and its implication on receiver sensitivity is defined in clause 3.2.2.10 of [ITU-T G.989].</p> <p>NOTE 18 – If the actual OPP is worse than the specified value, it must be compensated by increasing the transmitter mean launch power minimum specification by X dB for each X dB of extra OPP allowance, where X < 1.5 dB, while meeting all other Tx specifications. High penalty operation poses some risks, and PMD interoperability testing should be employed to measure the actual OPP with a receiver subject to in-band crosstalk as specified elsewhere in this table. To avoid system operation in very high penalty regimes, this note is only applicable to the DD20 fibre distance class.</p> <p>NOTE 19 – These values vary for each budget class based on the worst case combination of PtP WDM PON OOB, TWDM PON OOC, TWDM PON WNE-PSD and TWDM PON upstream ONU echoes (accounting for the maximum ODN split that can be obtained in each optical path loss class).</p> <p>NOTE 20 – This value is based on the following assumptions: consideration of multiple upstream ONU echoes and penalties of 0.4 dB (for N1) up to 0.8 dB (for E2).</p>					

ANEXO IV. Parámetros de la interfaz óptica de la subcapa PMD de NG-PON2 (PtP WDM)

- Parámetros de la interfaz óptica para la clase 1 (desde 1.2288Gbps hasta 1.25Gbps) en sentido descendente

Item	Unit	Value			
OLT transmitter (optical interface S)					
Nominal line rate	Gbit/s	1.2288 to 1.25			
Operating wavelength band	nm	1603-1625 (shared spectrum) 1524-1625 (expanded spectrum)			
Minimum operating channel spacing	GHz	50			
Maximum operating channel spacing	GHz	200			
Maximum spectral excursion	GHz	+/-12.5 for 50GHz CS +/-20 for 100GHz CS +/-25 for 200GHz CS			
Line code	-	Determined by application (scrambled NRZ assumed for parameter values)			
Mask of the transmitter eye diagram	-	See clause A.1.6.2			
Maximum reflectance of equipment at S/R- CG, measured at transmitter wavelength	dB	NA			
Minimum ORL of ODN at S/R-CG	dB	32			
ODN Class		N1	N2	E1	E2
Mean channel launch power minimum (at S/R-CG) without FEC	dBm	-1	+1	+3	+5
Mean channel launch power minimum (at S/R-CG) with FEC	dBm	0	+2	+4	+6
Mean channel launch power maximum (at S/R-CG) without FEC	dBm	+3	+5	+7	+9
Mean channel launch power maximum (at S/R-CG) with FEC	dBm	+4	+6	+8	+10
Maximum downstream WNE-PSD	dBm (15 GHz)	-63.7			
Minimum extinction ratio (Note 1)	dB	8.2			
Tolerance to reflected optical power	dB	-15			
Dispersion range (Note 2)	ps/nm	0 to $\frac{0.092 \times \lambda}{4} \left[1 - \left(\frac{1300}{\lambda} \right)^2 \right] \times 20$ (DD20), 0 to $\frac{0.092 \times \lambda}{4} \left[1 - \left(\frac{1300}{\lambda} \right)^2 \right] \times 40$ (DD40)			
Minimum side mode suppression ratio (at S/R-CP)	dB	30			
Maximum downstream per channel out-of- band optical PSD (Assuming eight Ch PtP WDM PON) (Note 3)	dBm (15 GHz)	-46.5			
Maximum downstream per channel out-of- channel optical PSD (Assuming eight Ch PtP WDM PON) (Note 4)	dBm (15 GHz)	-52.1			
Jitter generation	-	See clause A.1.6.3			
ONU receiver (optical interface R)					
Maximum OPP (Note 5) - with Raman effects	dB	1.5 (without FEC) 1.0 (with FEC ON)			
Maximum reflectance of equipment at R/S, measured at receiver wavelength	dB	-20			
Rx wavelength channel tuning time		See Table 9-2			
Maximum tuning granularity	GHz	CS/20			
ODN Class		N1	N2	E1	E2
Sensitivity (at R/S) @ BER=10 ⁻¹²	dBm	-31.5	-31.5	-31.5	-31.5
Sensitivity (at R/S) @ BER=10 ⁻⁴ (Note 6)	dBm	-30	-30	-30	-30
Overload (at R/S) @ BER=10 ⁻¹²	dBm	-11	-11	-11	-11
Overload (at R/S) @ BER=10 ⁻⁴ (Note 6)	dBm	-10	-10	-10	-10

In-band crosstalk tolerance	dB (15 GHz)	39.3
Consecutive identical digit immunity	bit	72
Jitter tolerance	–	See clause A.1.6.3
<p>NOTE 1 – A lower extinction ratio must be compensated by a larger transmitter launch power within the limits of the mean launch power maximum value.</p> <p>NOTE 2 – This formula (see clause 6.10 of [ITU-T G.652]) is used instead of the worst case value due to the large variation of dispersion within the PtP WDM PON wavelength band. This allows implementers to build devices only to the desired dispersion specification. λ is the longest possible wavelength in each channel, in nanometre units, considering the spectral excursion.</p> <p>NOTE 3 – This value is based the following assumptions: OOB impact from PtP WDM PON on TWDM PON can be controlled through appropriate filtering, 0.1 dB penalty, TWDM PON operates with FEC, and eight PtP WDM channels (seven interferers).</p> <p>NOTE 4 – This value is based the following assumptions: OOC in downstream can be controlled through filtering from WM, 0.1 dB penalty, PtP WDM PON operates without FEC, 8 PtP WDM channels (seven interferers).</p> <p>NOTE 5 – The specified penalty is valid up to a 40 km optical link distance. If the actual OPP is worse than the specified value, it must be compensated by the transmitter launch power increase up to the limits of the mean launch power maximum. Maximum OPP value assumes the use of the shared spectrum band, OPP related to Raman impacts for the expanded spectrum are determined by application.</p> <p>NOTE 6 – See clause 9.4.1 of [b-ITU-T G.Sup39] for additional details.</p> <p>NOTE 7 – The definition of In-band crosstalk tolerance and its implication on receiver sensitivity is defined in clause 3.2.2.10 of [ITU-T G.989].</p>		

- Parámetros de la interfaz óptica para la clase 2 (desde 2.4576Gbps hasta 2.666Gbps) en sentido descendente

Item	Unit	Value			
OLT transmitter (optical interface S)					
Nominal line rate	Gbit/s	2.4576 to 2.666			
Operating wavelength band	nm	1603-1625 (shared spectrum) 1524-1625 (expanded spectrum)			
Minimum operating channel spacing	GHz	50			
Maximum operating channel spacing	GHz	200			
Maximum spectral excursion	GHz	+/-12.5 for 50 GHz CS +/-20 for 100 GHz CS +/-25 for 200 GHz CS			
Line code	–	Determined by application (scrambled NRZ assumed for parameter values)			
Mask of the transmitter eye diagram	–	See clause A.1.6.2			
Maximum reflectance of equipment at S/R-CG, measured at transmitter wavelength	dB	NA			
Minimum ORL of ODN at S/R-CG	dB	32			
ODN Class		N1	N2	E1	E2
Mean channel launch power minimum (at S/R-CG) without FEC	dBm	+3	+5	FFS	FFS
Mean channel launch power minimum (at S/R-CG) with FEC		0	+2	+4	+6
Mean channel launch power maximum (at S/R-CG) without FEC	dBm	+7	+9	FFS	FFS
Mean channel launch power maximum (at S/R-CG) with FEC		+4	+6	+8	+10
Maximum downstream WNE-PSD	dBm (15 GHz)	FFS			
Minimum extinction ratio (Note 1)	dB	8.2			
Tolerance to reflected optical power	dB	-15			
Dispersion Range (Note 2)	ps/nm	0 to $\frac{0.092 \times \lambda}{4} \left[1 - \left(\frac{1300}{\lambda} \right)^2 \right] \times 20$ (DD20), 0 to $\frac{0.092 \times \lambda}{4} \left[1 - \left(\frac{1300}{\lambda} \right)^2 \right] \times 40$ (DD40)			
Minimum side mode suppression ratio (at S/R-CP)	dB	30			
Maximum downstream per channel out-of-band optical PSD (Note 3)	dBm (15 GHz)	-46.5			
Maximum downstream per channel out-of-channel optical PSD (Note 4)	dBm (15 GHz)	-52.1			
ONU receiver (optical interface R)					
Maximum OPP (Note 5) – with Raman effects	dB	2.0 (without FEC) 1.0 (with FEC)			
Maximum reflectance of equipment at R/S, measured at receiver wavelength	dB	-20			
Rx wavelength channel tuning time		See Table 9-2			
Maximum tuning granularity	GHz	CS/20			
ODN Class		N1	N2	E1	E2
Sensitivity (at R/S) @ BER=10 ⁻¹²	dBm	-28	-28	FFS	FFS
Sensitivity (at R/S) @ BER=10 ⁻⁴ (Note 6)	dBm	-30	-30	-30	-30
Overload (at R/S) @ BER=10 ⁻¹²	dBm	-7	-7	FFS	FFS
Overload (at R/S) @ BER=10 ⁻² (Note 6)	dBm	-10	-10	-10	-10
In-band crosstalk tolerance	dB (15 GHz)	43.3			
Consecutive identical digit immunity	bit	72			
Jitter tolerance	–	See clause A.1.6.3			
NOTE 1 – A lower extinction ratio must be compensated by a larger transmitter launch power within the limits of the "Mean launch power maximum" value.					
NOTE 2 – This formula (see clause 6.10 of [ITU-T G.652]) is used instead of the worst case value due to the large variation of dispersion within the PtP WDM PON wavelength band. This allows implementers to build devices only to the desired dispersion specification. λ is the longest possible wavelength in each channel, in nanometre units, considering the spectral excursion.					
NOTE 3 – This value is based the following assumptions: OOB impact from PtP WDM PON on TWDM PON can be controlled through appropriate filtering, 0.1 dB penalty, TWDM PON operates with FEC and 8 PtP WDM channels (seven interferers).					
NOTE 4 – This value is based the following assumptions: OOC in downstream can be controlled through filtering from WM, 0.1 dB penalty, PtP WDM PON operates without FEC, eight PtP WDM channels (seven interferers).					
NOTE 5 – The specified penalty is valid up to a 40 km optical link distance. If the actual OPP is worse than the specified value, it must be compensated by the transmitter launch power increase up to the limits of the mean launch power maximum. Maximum OPP value assumes the use of the shared spectrum band. OPP related to Raman impacts for the expanded spectrum are determined by application.					
NOTE 6 – See clause 9.4.1 of [b-ITU-T G.Sup39] for additional details.					
NOTE 7 – The definition of In-band crosstalk tolerance and its implication on receiver sensitivity is defined in clause 3.2.2.10 of [ITU-T G.989].					

- Parámetros de la interfaz óptica para la clase 3 (desde 6.144Gbps hasta 11.09Gbps) en sentido descendente

Item	Unit	Value			
OLT transmitter (optical interface S)					
Nominal line rate	Gbit/s	6.144 to 11.09			
Operating wavelength band	nm	1603-1625 (shared spectrum) 1524-1625 (expanded spectrum)			
Minimum operating channel spacing	GHz	50			
Maximum operating channel spacing	GHz	200			
Maximum spectral excursion	GHz	+/-12.5 for 50 GHz CS +/-20 for 100 GHz CS +/-25 for 200 GHz CS			
Line code	–	Determined by application (scrambled NRZ assumed for parameter values)			
Mask of the transmitter eye diagram	–	See clause A.1.6.2			
Maximum reflectance of equipment at S/R-CG, measured at transmitter wavelength	dB	NA			
Minimum ORL of ODN at S/R-CG	dB	32			
ODN Class		N1	N2	E1	E2
Mean channel launch power minimum (at S/R-CG) without FEC	dBm	+8	FFS	FFS	FFS
Mean channel launch power minimum (at S/R-CG) with FEC	dBm	+3.0	+5.0	+7.0	+9.0
Mean channel launch power maximum (at S/R-CG) without FEC	dBm	+11	FFS	FFS	FFS
Mean channel launch power maximum (at S/R-CG) with FEC	dBm	+7.0	+9.0	+11.0	+11.0
Maximum downstream WNE-PSD	dBm (15 GHz)	FFS			
Minimum extinction ratio (Note 1)	dB	8.2			
Tolerance to reflected optical power	dB	-15			
Dispersion range (Note 2)	ps/nm	0 to $\frac{0.092 \times \lambda}{4} \left[1 - \left(\frac{1300}{\lambda} \right)^2 \right] \times 20$ (DD20), 0 to $\frac{0.092 \times \lambda}{4} \left[1 - \left(\frac{1300}{\lambda} \right)^2 \right] \times 40$ (DD40)			
Minimum side mode suppression ratio (at S/R-CP)	dB	30			
Maximum downstream per channel out-of-band optical PSD (Assuming eight Ch PtP WDM PON) (Note 3)	dBm (15 GHz)	-46.5			
Maximum downstream per channel out-of-channel optical PSD (Assuming eight Ch PtP WDM PON) (Note 4)	dBm (15 GHz)	-52.1			
Jitter generation	–	See clause A.1.6.3			
ONU receiver (optical interface R)					
Maximum OPP (Note 5) – with Raman effects	dB	2.5 (without FEC) 2.0 (with FEC)			
Maximum reflectance of equipment at R/S, measured at receiver wavelength	dB	-20			
Rx wavelength channel tuning time		See Table 9-2			
Maximum tuning granularity	GHz	CS/20			
ODN Class		N1	N2	E1	E2
Sensitivity (at R/S) @ BER=10 ⁻¹²	dBm	-23.5	FFS	FFS	FFS
Sensitivity (at R/S) @ BER=10 ⁻³ (Note 6)	dBm	-28	-28	-28	-28
Overload (at R/S) @ BER=10 ⁻¹²	dBm	-2	FFS	FFS	FFS
Overload (at R/S) @ BER=10 ⁻³ (Note 6)	dBm	-7.0	-7.0	-7.0	-9.0
In-band crosstalk tolerance	dB (15 GHz)	47.8			
Consecutive identical digit immunity	bit	72			
Jitter tolerance	–	See clause A.1.6.3			
NOTE 1 – A lower extinction ratio must be compensated by a larger transmitter launch power within the limits of the “Mean launch power maximum” value.					
NOTE 2 – This formula (see clause 6.10 of [ITU-T G.652]) is used instead of the worst case value due to the large variation of dispersion within the PtP WDM PON wavelength band. This allows implementers to build devices only to the desired dispersion specification. λ is the longest possible wavelength in each channel, in nanometre units, considering the spectral excursion.					
NOTE 3 – This value is based the following assumptions: OOB impact from PtP WDM PON on TWDM PON can be controlled through appropriate filtering, 0.1 dB penalty, TWDM PON operates with FEC and eight PtP WDM channels (seven interferers).					
NOTE 4 – This value is based the following assumptions: OOC in downstream can be controlled through filtering from WM, 0.1 dB penalty, PtP WDM PON operates without FEC, eight PtP WDM channels (seven interferers).					
NOTE 5 – The specified penalty is valid up to a 40km optical link distance. If the actual OPP is worse than the specified value, it must be compensated by the transmitter launch power increase up to the limits of the Mean launch power maximum. Maximum OPP value assumes the use of the shared spectrum band, OPP related to Raman impacts for the expanded spectrum are determined by application.					
NOTE 6 – See clause 9.4.1 of [b-ITU-T G.Sup39] for additional details.					
NOTE 7 – The definition of In-band crosstalk tolerance and its implication on receiver sensitivity is defined in clause 3.2.2.10 of [ITU-T G.989].					

- Parámetros de la interfaz óptica para la clase 1 (desde 1.2288Gbps hasta 1.25Gbps) en sentido ascendente

Item	Unit	Value			
ONU transmitter (optical interface S)					
Nominal line rate	Gbit/s	1.2288 to 1.25			
Operating wavelength band	nm	1603-1625 (shared spectrum) 1524-1625 (expanded spectrum)			
Minimum tuning window	nm	Based on operating wavelength band			
Minimum operating channel spacing	GHz	50			
Maximum operating channel spacing	GHz	200			
Maximum spectral excursion	GHz	+/-12.5 for 50 GHz CS +/-20 for 100 GHz CS +/-25 for 200 GHz CS			
Maximum tuning granularity	GHz	CS/20			
Tx wavelength channel tuning time	ms	See Table 9-2			
Line code	-	Determined by application (scrambled NRZ assumed for parameter values)			
Mask of the transmitter eye diagram	-	See clause A.1.6.2			
Maximum reflectance of equipment at R/S, measured at transmitter wavelength	dB	-6			
Minimum ORL of ODN at R/S	dB	32			
ODN Class		N1	N2	E1	E2
Mean channel launch power minimum (at R/S) without FEC	dBm	+3	+3	+3	+3
Mean channel launch power minimum (at R/S) with FEC	dBm	0	0	0	0
Mean channel launch power maximum (at R/S) without FEC	dBm	+8	+8	+8	+8
Mean channel launch power minimum (at R/S) with FEC	dBm	+5	+5	+5	+5
Minimum extinction ratio (Note 1)	dB	8.2			
Tolerance to reflected optical power	dB	-15			
Dispersion range (Note 2)	ps/nm	0 to $\frac{0.092 \times \lambda}{4} \left[1 - \left(\frac{1300}{\lambda} \right)^2 \right] \times 20$ (DD20), 0 to $\frac{0.092 \times \lambda}{4} \left[1 - \left(\frac{1300}{\lambda} \right)^2 \right] \times 40$ (DD40)			
Minimum side mode suppression ratio (Note 3)	dB	30			
Maximum upstream out-of-band optical PSD (Note 4)	dBm (15 GHz)	-58.6			
Maximum upstream out-of-channel optical PSD – OOC1 (Note 5)	dBm (15 GHz)	-33.7 for 50 GHz CS -37.5 for 100 GHz CS -41.4 for 200 GHz CS			
Maximum upstream out-of-channel optical PSD – OOC2 (Note 5)	dBm (15 GHz)	-54.5			
Jitter transfer	-	See clause A.1.6.3			
Jitter generation	-	See clause A.1.6.3			
OLT receiver (optical interface R)					
Maximum OPP (Note 6) – with Raman effects	dB	1.5 (without FEC) 1.0 (with FEC on)			
Maximum reflectance of equipment at S/R-CG, measured at receiver wavelength	dB	-20			
ODN Class		N1	N2	E1	E2
Sensitivity (at S/R-CG) @ BER=10 ⁻¹²	dBm	-27.5	-29.5	-31.5	-33.5
Sensitivity (at S/R-CG) @ BER=10 ⁻⁴ (Note 7)	dBm	-30.0	-32.0	-34.0	-36.0
Overload (at S/R-CG) @ BER=10 ⁻¹²	dBm	-6	-8	-10	-12
Overload (at S/R-CG) @ BER=10 ⁻⁴ (Note 7)	dBm	-9	-11	-13	-15

In-band crosstalk tolerance	dB (15GHz)	34.8
Consecutive identical digit immunity	bit	72
Jitter tolerance	–	See clause A.1.6.3
<p>NOTE 1 – A lower extinction ratio must be compensated by a larger transmitter launch power within the limits of the "Mean launch power maximum" value.</p> <p>NOTE 2 – This formula (see clause 6.10 of [ITU-T G.652]) is used instead of the worst case value due to the large variation of dispersion within the PtP WDM PON wavelength band. This allows implementers to build devices only to the desired dispersion specification. λ is the longest possible wavelength in each channel, in nanometre units, considering the spectral excursion.</p> <p>NOTE 3 – For upstream, SMSR is measured on the laser output, before any filtering. This prevents a significant mode partition noise penalty. Other limitations on OOB and OOC PSD still apply to the R/S reference point.</p> <p>NOTE 4 – This value is based the following assumptions: OOB impact from PtP WDM PON on TWDM PON can be controlled through appropriate filtering, 0.1 dB penalty, TWDM PON operates with FEC, and 8 PtP WDM channels (seven interferers).</p> <p>NOTE 5 – This value is based the following assumptions: 1.0 dB penalty, PtP WDM PON operates without FEC, and eight PtP WDM channels (seven interferers). In some implementations, this requirement may be achieved by more tightly regulating the Tx output power (lowering the maximum level while maintaining the minimum level).</p> <p>NOTE 6 – The specified penalty is valid up to a 40 km optical link distance. If the actual OPP is worse than the specified value, it must be compensated by the transmitter launch power increase up to the limits of the mean launch power maximum. Maximum OPP value assumes the use of the shared spectrum band, OPP related to Raman impacts for the expanded spectrum are determined by application.</p> <p>NOTE 7 – See clause 9.4.1 of [b-ITU-T G.Sup39] for additional details.</p> <p>NOTE 8 – The definition of In-band crosstalk tolerance and its implication on receiver sensitivity is defined in clause 3.2.2.10 of [ITU-T G.989].</p>		

- Parámetros de la interfaz óptica para la clase 2 (desde 2.4576Gbps hasta 2.666Gbps) en sentido ascendente

Item	Unit	Value			
ONU transmitter (optical interface S)					
Nominal line rate	Gbit/s	2.4576 to 2.666			
Operating wavelength band	nm	1603-1625 (shared spectrum) 1524-1625 (expanded spectrum)			
Minimum tuning window	nm	Based on operating wavelength band			
Minimum operating channel spacing	GHz	50			
Maximum operating channel spacing	GHz	200			
Maximum spectral excursion	GHz	+/-12.5 for 50 GHz CS +/-20 for 100 GHz CS +/-25 for 200 GHz CS			
Maximum tuning granularity	GHz	CS/20			
Tx wavelength channel tuning time	ms	See Table 9-2			
Line code	-	Determined by application (scrambled NRZ assumed for parameter values)			
Mask of the transmitter eye diagram	-	See clause A.1.6.2			
Maximum reflectance of equipment at R/S, measured at transmitter wavelength	dB	-6			
Minimum ORL of ODN at R/S	dB	32			
ODN Class		N1	N2	E1	E2
Mean channel launch power minimum (at R/S) without FEC	dBm	+3	+3	+3	+3
Mean channel launch power minimum (at R/S) with FEC	dBm	+0	+0	+0	+0
Mean channel launch power maximum (at R/S) without FEC	dBm	+8	+8	+8	+8
Mean channel launch power maximum (at R/S) with FEC	dBm	+5	+5	+5	+5
Minimum extinction ratio (Note 1)	dB	8.2			
Tolerance to reflected optical power	dB	-15			
Dispersion range (Note 2)	ps/nm	0 to $\frac{0.092 \times \lambda}{4} \left[1 - \left(\frac{1300}{\lambda} \right)^2 \right] \times 20$ (DD20), 0 to $\frac{0.092 \times \lambda}{4} \left[1 - \left(\frac{1300}{\lambda} \right)^2 \right] \times 40$ (DD40)			
Minimum side mode suppression ratio (Note 3)	dB	30			
Maximum upstream out-of-band optical PSD (Assuming eight Ch P4P WDM PON) (Note 4)	dBm (15 GHz)	-58.6			
Maximum upstream out-of-channel optical PSD – OOC2 (Note 5)	dBm (15 GHz)	-54.5			
Jitter transfer		See clause A.1.6.3			
Jitter generation	-	See clause A.1.6.3			
OLT receiver (optical interface R)					
ODN Class		N1	N2	E1	E2
Maximum OPP – without FEC	dB	2.0	2.0	2.0	2.0
Maximum OPP – with FEC ON (Note 6)		1.0	1.0	1.5	1.5
Maximum reflectance of equipment at S/R-CG, measured at receiver wavelength	dB	-20			
ODN Class		N1	N2	E1	E2
Sensitivity (at S/R-CG) @ BER=10 ⁻¹²	dBm	-28	-30	-32	-34
Sensitivity (at S/R-CG) @ BER=10 ⁻⁴ (Note 7)	dBm	-30	-32	-34.5	-36.5
Overload (at S/R-CG) @ BER=10 ⁻¹²	dBm	-6	-8	-10	-12
Overload (at S/R-CG) @ BER=10 ⁻⁴ (Note 7)	dBm	-9	-11	-13	-15
In-band crosstalk tolerance	dB (15 GHz)	34.8			
Consecutive identical digit immunity	bit	72			
Jitter tolerance	-	See clause A.1.6.3			

NOTE 1 – A lower extinction ratio must be compensated by a larger transmitter launch power within the limits of the "Mean launch power maximum" value.

NOTE 2 – This formula (see clause 6.10 of [ITU-T G.652]) is used instead of the worst case value due to the large variation of dispersion within the PtP WDM PON wavelength band. This allows implementers to build devices only to the desired dispersion specification. λ is the longest possible wavelength in each channel, in nanometre units, considering the spectral excursion.

NOTE 3 – For upstream, SMSR is measured on the laser output, before any filtering. This prevents a significant mode partition noise penalty. Other limitations on OOB and OOC PSD still apply to the R/S reference point.

NOTE 4 – This value is based the following assumptions: OOB impact from PtP WDM PON on TWDM PON can be controlled through appropriate filtering, 0.1 dB penalty, TWDM PON operates with FEC and eight PtP WDM channels (seven interferers).

NOTE 5 – This value is based the following assumptions: 1.0 dB penalty, PtP WDM PON operates without FEC, and eight PtP WDM channels (7 interferers). In some implementations, this requirement may be achieved by more tightly regulating the Tx output power (lowering the maximum level while maintaining the minimum level).

NOTE 6 – The specified penalty is valid up to a 40 km optical link distance. If the actual OPP is worse than the specified value, it must be compensated by the transmitter launch power increase up to the limits of the Mean launch power maximum. Maximum OPP value assumes the use of the shared spectrum band, OPP related to Raman impacts for the expanded spectrum are determined by application.

NOTE 7 – See clause 9.4.1 of [ITU-T G.Sup39] for additional details.

NOTE 8 – The definition of In-band crosstalk tolerance and its implication on receiver sensitivity is defined in clause 3.2.2.10 of [ITU-T G.989].

- Parámetros de la interfaz óptica para la clase 3 (desde 6.144Gbps hasta 11.09Gbps) en sentido ascendente

Item	Unit	Value			
ONU transmitter (optical interface S)					
Nominal line rate	Gbit/s	6.144 to 11.09			
Operating wavelength band	nm	1603-1625 (shared spectrum) 1524-1625 (expanded spectrum)			
Minimum tuning window	nm	Based on operating wavelength band			
Minimum operating channel spacing	GHz	50			
Maximum operating channel spacing	GHz	200			
Maximum spectral excursion	GHz	+/-12.5 for 50 GHz CS +/-20 for 100 GHz CS +/-25 for 200 GHz CS			
Maximum tuning granularity	GHz	CS/20			
Tx wavelength channel tuning time	ms	See Table 9-2			
Line code	-	Determined by application (scrambled NRZ assumed for parameter values)			
Mask of the transmitter eye diagram	-	See clause A.1.6.2			
Maximum reflectance of equipment at R/S, measured at transmitter wavelength	dB	-6			
Minimum ORL of ODN at R/S	dB	32			
ODN Class		N1	N2	E1	E2
Mean channel launch power minimum (at R/S) without FEC	dBm	+3	+3	+3	FFS
Mean channel launch power minimum (at R/S) with FEC	dBm	+4.0	+4.0	+4.0	+4.0
Mean channel launch power maximum (at R/S) without FEC	dBm	+8	+8	+8	FFS
Mean channel launch power maximum (at R/S) with FEC	dBm	+9.0	+9.0	+9.0	+9.0
Minimum extinction ratio (Note 1)	dB	8.2			
Tolerance to reflected optical power	dB	-15			
Dispersion range (Note 2)	ps/nm	0 to $\frac{0.092 \times \lambda}{4} \left[1 - \left(\frac{1300}{\lambda} \right)^2 \right] \times 20$ (DD20), 0 to $\frac{0.092 \times \lambda}{4} \left[1 - \left(\frac{1300}{\lambda} \right)^2 \right] \times 40$ (DD40)			
Minimum side mode suppression ratio (Note 3)	dB	30			
Maximum upstream out-of-band optical PSD (Note 4)	dBm (15 GHz)	-58.6			
Maximum upstream out-of-channel optical PSD – OOC1 (Note 5)	dBm (15 GHz)	-33.7 for 50GHz CS -37.5 for 100 GHz CS -41.4 for 200 GHz CS			
Maximum upstream out-of-channel optical PSD – OOC2 (Note 5)	dBm (15 GHz)	-54.5			
Jitter transfer		See clause A.1.6.3			
Jitter generation	-	See clause A.1.6.3			
OLT receiver (optical interface R)					
ODN Class		N1	N2	E1	E2
Maximum OPP – without FEC	dB	2.5	2.5	2.5	2.5
Maximum OPP – with FEC ON (Note 6)		1.5	1.5	2.0	2.0
Maximum reflectance of equipment at S/R-CG, measured at receiver wavelength	dB	-20			
ODN Class		N1	N2	E1	E2
Sensitivity (at S/R-CG) @ BER=10 ⁻¹²	dBm	-28.5	-30.5	-32.5	FFS
Sensitivity (at S/R-CG) @ BER=10 ⁻³ (Note 7)	dBm	-26.5	-28.5	-31.0	NA
Overload (at S/R-CG) @ BER=10 ⁻¹²	dBm	-6	-8	-10	FFS
Overload (at S/R-CG) @ BER=10 ⁻³ (Note 7)	dBm	-5.0	-7.0	-9.0	NA
In-band crosstalk tolerance	dB (15 GHz)	34.8			
Consecutive identical digit immunity	bit	72			
Jitter tolerance	-	See clause A.1.6.3			

NOTE 1 – A lower extinction ratio must be compensated by a larger transmitter launch power within the limits of the "Mean launch power maximum" value.

NOTE 2 – This formula (see clause 6.10 of [ITU-T G.652]) is used instead of the worst case value due to the large variation of dispersion within the PtP WDM PON wavelength band. This allows implementers to build devices only to the desired dispersion specification. λ is the longest possible wavelength in each channel, in nanometre units, considering the spectral excursion.

NOTE 3 – For upstream at the ONU, SMSR is measured on the laser output, before any filtering. This prevents a significant mode partition noise penalty. Other limitations on OOB and OOC power still apply to the R/S reference point.

NOTE 4 – This value is based the following assumptions: OOB impact from PtP WDM PON on TWDM PON can be controlled through appropriate filtering, 0.1 dB penalty, TWDM PON operates with FEC and eight PtP WDM channels (seven interferers).

NOTE 5 – This value is based the following assumptions: 1.0 dB penalty, PtP WDM PON operates without FEC, and eight PtP WDM channels (seven interferers). In some implementations, this requirement may be achieved by more tightly regulating the Tx output power (lowering the maximum level while maintaining the minimum level).

NOTE 6 – The specified penalty is valid up to a 40 km optical link distance. If the actual OPP is worse than the specified value, it must be compensated by the transmitter launch power increase up to the limits of the mean launch power maximum. Maximum OPP value assumes the use of the shared spectrum band, OPP related to Raman impacts for the expanded spectrum are determined by application.

NOTE 7 – See clause 9.4.1 of [ITU-T G.Sup39] for additional details.

NOTE 8 – The definition of In-band crosstalk tolerance and its implication on receiver sensitivity is defined in clause 3.2.2.10 of [ITU-T G.989].