



**Universidad
Europea**

LAUREATE INTERNATIONAL UNIVERSITIES

UNIVERSIDAD EUROPEA DE MADRID

ESCUELA DE ARQUITECTURA, INGENIERÍA Y DISEÑO

MASTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DE

TELECOMUNICACIÓN

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**LA LLEGADA DE LAS NUEVAS
TECNOLOGÍAS SOBRE REDES PON AL
ACCESO FIJO ESPAÑOL**

MIGUEL ÁNGEL GONZÁLEZ DE PAZ

CURSO 2015-2016

TÍTULO: La llegada de las nuevas tecnologías sobre redes PON al acceso fijo español

AUTOR: Miguel Ángel González de Paz

TITULACIÓN: MASTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DE
TELECOMUNICACIÓN

DIRECTOR DEL TRABAJO: Silvia Abad Valtierra

FECHA: Julio de 2016

RESUMEN

En el presente trabajo se expone el despliegue actual de FTTH en el mercado español donde la tecnología predominante es el GPON, con sus ventajas e inconvenientes que se han ido encontrando desde su entrada como principal impulsor de la banda ancha sobre las Redes de Acceso. Se ha dado una respuesta a esos inconvenientes con dos nuevas tecnologías donde se han desarrollado sus principales características explicando sus estándares y con pruebas realizadas en laboratorio que demuestran lo que pueden aportar. Se han establecido criterios de diseño para el despliegue de las nuevas tecnologías y aspectos a determinar por parte de los operadores.

El XGS-PON será la siguiente evolución de los Sistemas PON en España donde se aportará unas tasas simétricas mayores que en el GPON. Los 10 Gbps simétricos que podrá aportar por puerto PON cuando los fabricantes aporten variedad de soluciones para abaratar costes a los operadores, darán respuesta a los problemas que en el Trabajo se han planteado. Además, se dará a conocer el salto evolutivo definitivo de las Redes de Acceso: el NG-PON2. Esta tecnología, con un estándar más maduro que XGS-PON, apostará por transmitir 40 Gbps simétricos gracias al uso de cuatro longitudes de onda distintas que llevarán 10 Gbps simétricos cada uno. Todas las tecnologías pueden convivir en la misma fibra óptica desplegada hasta los clientes.

Este Trabajo persigue dar una visión comercial a estas nuevas tecnologías. Más allá de explicar los fundamentos físicos y electrónicos de las mismas, se pretende explicar y demostrar qué pueden aportar las siguientes evoluciones de los Sistemas PON a los operadores y a la cantidad de servicio y de ancho de banda que demandan los clientes en España.

Palabras clave: XGS-PON, GPON, NG-PON2, lambda, puerto PON, Gbps, longitud de onda.

ABSTRACT

In this project we discussed the current deployment of FTTH in the Spanish market where the predominant technology is GPON, with its advantages and disadvantages that have been found since entering as the main driver of broadband on Access Networks. There has been a response to these problems with two new technologies which have developed their main characteristics explaining its standards and laboratory tests that show what they can contribute. They have been established design criteria for the deployment of new technologies and aspects to be determined by the operators.

XGS-PON is the next evolution of PON Systems in Spain where a higher symmetrical rates shall be provided in the GPON. Symmetrical 10 Gbps per PON port can provide when manufacturers provide variety of solutions to reduce costs to operators will answer to the problems in the project have been raised. It also will release the final evolutionary leap Network Access: NG-PON2. This technology, with a more mature standard than XGS-PON, 40 Gbps transmit bet on symmetric by using four different wavelengths that carry 10 Gbps symmetrical each. All technologies can coexist in the same optical fiber deployed to customers.

This project aims to provide business insight to these new technologies, beyond explaining the physical and electronic reasons therefore, it is to explain and demonstrate what can make the following changes PON Systems operators and the amount of service and bandwidth demanding customers in Spain.

Key words: XGS-PON, GPON, NG-PON2, PON port, Gbps, wavelength

AGRADECIMIENTOS

A mi novia, Mónica Yagüe, por apoyarme y animarme desde el momento que empecé toda esta aventura para conseguir mejorar en lo humano y en lo profesional. Por su amor y cariño incondicional y por su comprensión por tantas horas invertidas, y por toda su ayuda y consejos. Extensivo a su familia por el interés y la ayuda que me han dado.

A mis padres, Milagros de Paz y Miguel Ángel González, que me han dado la oportunidad de poder estudiar lo que he querido y de ser lo que soy, y a los que no hay ni tiempo ni palabras para agradecerles lo suficiente todo lo que hacen por mí.

A mi tía Goya, que en paz descanse, porque ha contribuido en más cosas que en el recuerdo, en conseguir este logro de aquel chico que cuidaba con tanto cariño.

A mi tutora, Silvia Abad, por la ayuda prestada, consejos, correcciones y tiempo que ha sacado de donde no tenía.

A mis compañeros de Telefónica, Raúl Fernández, Augusto Blanco, Jesús Cotano, entre otros muchos; a mis compañeros de Altran como Javier Pérez, Rocío Bravo; a mis compañeros de Nokia como Miguel Ángel Ruiz o de Huawei como Santiago Braseró. A todos ellos, gracias por hacer posible con vuestros conocimientos, trabajo, tiempo y atención, el que pueda presentar este documento.

A mis compañeros de clase, Carlos García, Patricia Chacón, Beatriz Torre, Daniel Pastor, José María Abad y tantos otros que me dejaron, porque cada fin de semana y a horas intempestivas se dejaban el alma por conseguir que todos llegáramos a este punto.

A Alejandro Alonso, compañero de Telefónica, que me ha dado toda la ayuda posible para sacar adelante este curso y que me ha servido también de guía en estos 10 meses.

A mis amigos y familia, por el interés y el ánimo que me han dado este tiempo.

Índice

RESUMEN	3
ABSTRACT	4
AGRADECIMIENTOS.....	5
Capítulo 1. INTRODUCCIÓN	17
1.1 Planteamiento del problema	17
1.2 Objetivos del Trabajo	17
1.3 Estructura del Trabajo	18
Capítulo 2. Situación de la tecnología actual: GPON	20
2.1 Introducción	20
2.2 ¿Qué es el GPON?	24
2.3 Situación del mercado actual español	35
2.4 La obsolescencia del GPON en España.....	40
2.4.1 El problema de las conexiones simétricas.....	41
2.4.2 El problema de la repartición de recursos	44
2.4.3 El problema del dimensionado de tráfico la OLT	45
2.4.4 El problema de la capacidad de routing de una OLT.....	46
2.4.5 La diferenciación de los clientes.....	47
Capítulo 3. Un paso intermedio: XGS-PON.....	49
3.1 Introducción. ¿Por qué surge XGS-PON?	49
3.2 ¿Qué es el XGS-PON?	51
3.3 Resultados de la demo de XGS-PON y convivencia con el GPON	70
3.4 Visión de negocio y del mercado del XGS-PON.....	87
Capítulo 4. La solución de futuro: NG-PON2	99
4.1 ¿Qué es el NG-PON2 y qué soluciones aporta?	99
4.2 Descripción tecnológica del NG-PON2	114
4.2.1 Descripción tecnológica de la especificación G.989.1.....	115
4.2.2 Descripción tecnológica de la especificación G.989.2.....	117
4.2.3 Descripción tecnológica de la especificación G.989.3.....	123

4.3	Resultados de la demo de NG-PON2 y convivencia con otras tecnologías.....	133
4.4	Visión de negocio y del mercado del NG-PON2	158
Capítulo 5.	Conclusiones y Futura Líneas de Trabajo	168
Capítulo 6.	Pliego de Condiciones	172
Capítulo 7.	Presupuesto.....	174
7.1.1	Precios unitarios.....	174
7.1.2	Presupuesto Total	176
BIBLIOGRAFÍA.....		178

Índice de Figuras

Figura 1 Distribución de clientes activos de banda ancha en el mundo	20
Figura 2 Crecimiento interanual de clientes de FTTH en Europa	21
Figura 3 Suscriptores FTTH por países en Europa y relación de clientes en España. Fuente Analysis Manson.....	22
Figura 4 Arquitectura FTTH sin GPON obtenida de http://www.fiberopticatel.com/	23
Figura 5 Diferencia tramas y protocolos empleados entre GPON y GE-PON gracias a NTT	23
Figura 6 Elementos de una Red GPON	24
Figura 7 Arquitectura física de una ODN.....	25
Figura 8 Distribución de longitudes de onda para GPON usado en España	25
Figura 9 Distribución de longitudes de onda para GPON según estándar G.984.3	26
Figura 10 Estudio con tablas de atenuaciones y arquitectura de un tendido FTTH	27
Figura 11 Ilustración 8-1 del estándar G.984.3 donde se observa el entramado GTC	28
Figura 12 Ilustración 8-2 del estándar G.984.3 donde se observa un ejemplo de trama GTC downstream	29
Figura 13 Ilustración 8-3 del estándar G.984.3 de los campos de la cabecera de trama GTC....	29
Figura 14 Ejemplo de BWMAP enviado hacia las ONTs	30
Figura 15 Tasa máxima downstream con FEC activado en puerto PON.	32
Figura 16 Resumen de tipos de Anchos de banda y Regla de Provisión	34
Figura 17 Resumen de tipos de TCONT empleados de forma comercial.....	35
Figura 18 Arquitectura típico Triple Play Servicios sobre cliente residencial	38
Figura 19 HGU de Movistar. Imagen de xatakamovil.com	39
Figura 20 Evolución del BW recibido vs latencia con distintas ONTs del mercado español	42
Figura 21 Chasis OLT de Huawei Modelo MA5600T	45
Figura 22 Chasis OLT de Alcatel-Lucent (Nokia) Modelo ISAM 7302	46

Figura 23 Test de velocidad en línea 1 Gbps simétrica sobre XG-PON1 (NG-PON1)	50
Figura 24 Escenario 1 de coexistencia. Figura A.6-1 del G.9807.1.....	52
Figura 25 Escenario 2 de coexistencia. Figura A.6-2 del G.9807.1.....	53
Figura 26 Escenario 3 de coexistencia. Figura A.6-3 del G.9807.1.....	54
Figura 27 Escenario general de coexistencia. Figura A.5-5 del G.9807.1.....	54
Figura 28 Arquitectura de red para XGS-PON en el apartado A.5-1 del G.9807.1.....	55
Figura 29 Distintas arquitecturas de red para XGS-PON en el apartado A.5-2 del G.9807.1.....	56
Figura 30 Arquitecturas FTTx posibles para un despliegue con sistemas PON.....	57
Figura 31 Gráfico de las distancias máximas entre ONU y OLT del apartado A.5-1 del G.9807.1	57
Figura 32 Mapeado de las tramas en downstream en distintas capas del apartado C.6-1 del G.9807.1	59
Figura 33 Mapeado de las tramas en downstream en distintas capas del apartado. Resumen	59
Figura 34 Pila de protocolos para XGS-PON del apartado A.I.12 del G.9807.1.....	60
Figura 35 Balance total de pérdidas en despliegue con tecnología XGS-PON y GPON.....	61
Figura 36 Canales para gestión de las ONUs de XGS-PON en el apartado C.6-4 del G.9807.1 ...	61
Figura 37 Esquema de envío de tráfico entre OLT y ONU en el apartado C.6-5 del G.9807.1 ...	62
Figura 38 Esquema de envío de tráfico entre ONUs y OLT (up) en el apartado C.6-6 del G.9807.1	63
Figura 39 Estructura de trama de datos con tramas XGEM en apartado C.9-1 del G.9807.1.....	64
Figura 40 Estructura de una trama XGEM en apartado C.9-2 del G.9807.1	64
Figura 41 Encapsulamiento de trama Ethernet en trama XGEM en apartado C.9-5 del G.9807.1	65
Figura 42 Encapsulamiento de paquete MPLS en una trama XGEM en apartado C.9-6 del G.9807.1	65
Figura 43 Abstracción del DBA para XGS-PON en apartado C.7-1 del G.9807.1.....	66
Figura 44 Inserción de palabras código FEC en downstream. Figura C.10-9 del G.9807.1.....	67
Figura 45 Inserción de palabras código FEC en upstream. Figura C.10-9 del G.9807.1.....	67
Figura 46 Posible diseño de un CEx con cuatro entradas y dos salidas independientes	69

Figura 47 Escenario de pruebas demo XGS-PON con convivencia GPON	72
Figura 48 Configuración de servicios residenciales simulados para una ONT	72
Figura 49 Configuración de servicios conectividad simulados más ONT real de GPON	73
Figura 50 Configuración de servicios conectividad con distinto QoS más ONT real de GPON ...	73
Figura 51 Longitud de onda de trabajo de downstream XGS-PON a 1578 nm	74
Figura 52 Longitud de onda de trabajo de upstream XGS-PON a 1271 nm	75
Figura 53 Longitud de onda de trabajo de downstream XGS-PON a 1578 nm y GPON a 1492 nm	75
Figura 54 Longitud de onda de trabajo de upstream XGS-PON a 1271 nm y GPON a 1314 nm	76
Figura 55 Ejemplo de medición con medidor EXFO sobre XGS-PON	77
Figura 56 Tasa máxima DL medido a nivel Ethernet sobre ONT XGS-PON	78
Figura 57 Tasa máxima UL medido a nivel Ethernet sobre ONT XGS-PON	79
Figura 58 Tasa máxima DL medido a nivel Ethernet sobre dos ONTs XGS-PON	79
Figura 59 Tasa máxima UL medido a nivel Ethernet empleando dos ONTs XGS-PON	80
Figura 60 Tasa máxima DL medido a nivel Ethernet sobre una ONT XGS-PON con jumbo frame sin FEC	80
Figura 61 Tasa máxima UL medido a nivel Ethernet sobre dos ONTs XGS-PON con jumbo frame sin FEC	81
Figura 62 Tasa máxima medido a nivel Ethernet sobre una ONT XGS-PON	81
Figura 63 Tasa máxima medido a nivel Ethernet sobre dos ONTs XGS-PON	82
Figura 64 Tasa máxima medido a nivel Ethernet sobre dos ONTs XGS-PON con tramas 100 Bytes	82
Figura 65 Tasa máxima medido a nivel Ethernet sobre dos ONTs XGS-PON con calidades distintas	83
Figura 66 Convivencia de servicios empresa + residencial 300M sobre XGS-PON con FEC	83
Figura 67 Convivencia de servicios empresa + residencial 500M sobre XGS-PON con FEC	84
Figura 68 Convivencia de servicios empresas simétricos sobre dos ONTs XGS-PON con FEC con 1482 Bytes	84
Figura 69 Convivencia de servicios empresas simétricos sobre dos ONTs XGS-PON con FEC con 100 Bytes	85

Figura 70 Tasas recibidas obtenidas en demo XGS-PON con y sin FEC.....	86
Figura 71 Evolución planificada por Alcatel-Lucent disponible en https://techzine.alcatel-lucent.com/	87
Figura 72 Evolución planificada por ZTE disponible en http://www.zte.com.cn/	88
Figura 73 Evolución planificada por FiberOpticTel disponible en http://www.fiberoptictel.com/	88
Figura 74 Evolución de costes y disponibilidad tecnológica para XGS-PON	90
Figura 75 Estimación de demanda tráfico upstream por usuario por Adtran	92
Figura 76 Distribución de ancho de banda según clientes y servicios por Adtran.....	92
Figura 77 Esquema de conexiones y despliegue convivencia XGS-PON y GPON.....	93
Figura 78 Test de velocidad con SpeedTest.net con XGS-PON	98
Figura 79 Equipo NG-PON Xpert de Tracespan compatible con XGS-PON y NG-PON2	98
Figura 80 Propuesta XLG-PON.....	100
Figura 81 Propuesta TWDM-PON con empleo de cuatro lambdas de XG-PON1.....	100
Figura 82 Propuesta WDM-PON con empleo de 40 lambdas de 1 Gbps. Lambda / cliente	101
Figura 83 Propuesta OFDM-PON. Señal OFDM para cada cliente. Esquema propuesto por ZTE	101
Figura 84 Propuesta básica de lambdas para TWDM-PON simétrico	104
Figura 85 Esquema conceptual de bloques de una ONU de NGPON2.....	106
Figura 86 Escenario servicios sobre TWDM-PON + GPON en Alcatel-Lucent	107
Figura 87 Pila de protocolos sobre Sistemas PON para provisión de servicios.....	108
Figura 88 Distribución de longitudes de onda de tecnologías anteriores. Figura 8-2 del estándar G.989.1	108
Figura 89 Distribución de longitudes de onda incluidas NGPON2	109
Figura 90 Distribución de longitudes de onda incluidas NG-PON2 y OTDR	109
Figura 91 Escenario de tecnologías sobre sistema PON. Figura 5-1 del estándar G.989.1.....	110
Figura 92 Atenuación en G.652 según longitud de onda. Figura 8-1 del estándar G.989.1	110
Figura 93 Posible escenario de uso de lambdas en cada tarjeta de línea. Lambda fija o configurable	112

Figura 94 Modelo de tarjeta de línea con un Puerto PON emitiendo en 4 lambdas a la vez ...	113
Figura 95 Posible escenario de uso de lambdas por tarjeta de línea. Lambda fija o configurable	114
Figura 96 Escenario de convivencia con NG-PON2. Figura 5-1 del G.989.1.....	116
Figura 97 Escenario Green-Field con NG-PON2. Figura 5-2 del G.989.2.....	120
Figura 98 Balance óptico de XGS-PON, NG-PON2 y GPON en un despliegue real.....	121
Figura 99 Máscaras para el límite de Cross-talk entre NG-PON2 y otras tecnologías	122
Figura 100 Canales y opciones para la gestión entre ONT y OLT. Figura 6-4 del G.989.3	124
Figura 101 Capas y tramas para NG-PON2 en downstream. Figura 6-1 del G.989.3.....	127
Figura 102 Capas y tramas para NG-PON2 en upstream. Figura 6-2 del G.989.3.....	128
Figura 103 Trama FS para el downstream. Figura 8-1 del G.989.3	129
Figura 104 Esquema de las capas de funcionamiento NG-PON2. Figura 6-3 de G.989.3	129
Figura 105 Envío de BWMAP entre OLT y ONTs. Figura 7-1 del G.989.3	130
Figura 106 Diseño de solución NG-PON2 con WM y CEx integrado en mismo equipo	136
Figura 107 Escenario de pruebas con NG-PON2, XGS-PON y GPON inicial.....	137
Figura 108 Escenario de pruebas con NG-PON2, XGS-PON y GPON y OSA	137
Figura 109 Escenario de pruebas con dos ONTs de NG-PON en distinta lambda.....	138
Figura 110 Escenario de pruebas con dos ONTs de NG-PON en misma lambda	138
Figura 111 Configuración y esquema de servicio de conectividad con cuatro ONTs distinta lambda NG-PON2	139
Figura 112 Configuración y esquema de servicio de Triple Play para una ONT de NG-PON2 ..	140
Figura 113 Longitudes de onda downstream demo NG-PON2.....	143
Figura 114 Longitudes de onda upstream demo NG-PON2.....	144
Figura 115 dos longitudes de onda upstream demo NG-PON2 convivencia con XGS-PON y GPON.....	145
Figura 116 Una longitud de onda downstream NG-PON2 convivencia con XGS-PON y GPON	145
Figura 117 Dos longitudes de onda downstream demo NG-PON2 convivencia con GPON	146
Figura 118 Longitud de onda upstream demo NG-PON2. Dos ONUs en misma lambda	147

Figura 119 Longitud de onda upstream atenuada demo NG-PON2 sin afectar a otras	147
Figura 120 Marco Mundial de despliegues de nuevas tecnologías PON 2014	159
Figura 121 Posible escenario de despliegue para convivencia de Sistemas PON	160
Figura 122 Posible escenario para solo NG-PON2 con varios servicios y operadores	160
Figura 123 Posible escenario para solo NG-PON2 para varios operadores sobre misma ODN	160
Figura 124 Propuesta de servicios sobre NG-PON2 con equipamiento de <i>www.calix.com</i>	161
Figura 125 Imagen descriptiva de equipos conectados para IoT	162
Figura 126 Evolución costes – disponibilidad equipos XGS-PON y NG-PON2	163
Figura 127 Esquema de conexiones ópticas con repartidos ópticos con CEx y WDM separados	165

Índice de Tablas

Tabla 1 Características de la fibra G.652.D de la tabla 4 del estándar G.652 de la ITU-T	27
Tabla 2 Láseres recogidos por estándar G.984.2 para OLT y ONT	27
Tabla 3 Casos de instalaciones reales con láseres de distinto tipo en downstream	31
Tabla 4 Casos de instalaciones reales con láseres de distinto tipo en upstream	31
Tabla 5 Datos Líneas FTTH minorista por operador cierre 2015.....	36
Tabla 6 Datos Líneas FTTH minorista generales diciembre 2015 – marzo 2016.....	36
Tabla 7 Resumen de Velocidades ofertadas sobre FTTH en el sector español.....	37
Tabla 8 Resultados Pruebas de Saturación sobre un puerto PON con 60 ONTs.....	42
Tabla 9 Rangos de longitudes de onda de trabajo para XG-PON1. Tabla A.5-1 del G.9807.1	52
Tabla 10 Balances ópticos para enlace XGS-PON apartado B.6-1 del G.9807.1	60
Tabla 11 Valores de ID para los XGEM Ports apartado C.6-6 del G.9807.1	63
Tabla 12 Comparativa de tramas usando FEC o no para XGS-PON. Tabla C.8-1 del G.9807.1 ...	66
Tabla 13 Valores umbrales para detectar ONU Rogue. Tabla C.13-1 del G.9807.1.....	68
Tabla 14 Valores ópticos de partida en montaje demo XGS-PON	77
Tabla 15 Cálculos teóricos y resumen de máximo ancho de banda según G.9807.1	86
Tabla 16 Evolución de disponibilidad y costes de distintas tecnologías PON.....	90
Tabla 17 Disponibilidad equipamiento XGS-PON suministradores en España	97
Tabla 18 Longitudes de onda para NG-PON2 y compatibilidad con tecnologías.....	102
Tabla 19 Longitudes de onda para NG-PON2 downstream según Tabla 11-2 del G.989.2	102
Tabla 20 Rejilla de lambdas para upstream en NG-PON2 según estándar G.989.2	103
Tabla 21 Frecuencias, lambdas y espaciamiento de trabajo típico para NG-PON2 en downstream	118
Tabla 22 Frecuencias, lambdas y espaciamiento de trabajo típico para NG-PON2 en upstream	118
Tabla 23 Timeout para sintonización de ONTs. Tabla 9-2 de la G.989.2.....	119

Tabla 24 Balance de pérdidas para la ODN según la clase definida.....	120
Tabla 25 Distancias máximas para NG-PON2 según estándar G.989.2.....	121
Tabla 26 Máxima velocidad de línea nominal para una longitud de onda en NG-PON2.....	122
Tabla 27 Diferencias entre las tramas de NG-PON2 y GPON.....	123
Tabla 28 Canales downstream y sus identificadores para NG-PON2. Tabla 6-3 del G.989.3 ...	126
Tabla 29 Anchos de banda nominales por lambda en NG-PON2. Tabla 6-1 del G.989.3	126
Tabla 30 Anchos de banda nominales por ONT en NG-PON2. Tabla 6-2 del G.989.3	126
Tabla 31 Umbrales para evitar solapes de ventana en NG-PON2. Tabla 13-1 de G.989.3	132
Tabla 32 Estudio Sensibilidad y Balance Óptico con NG-PON2	148
Tabla 33 Máximo simétrico en servicio Internet simulado en una ONT NG-PON2 sin FEC.....	149
Tabla 34 Máximo BW downstream en servicio Internet simulado en una ONT NG-PON2 con FEC.....	149
Tabla 35 Tabla 8-1 del estándar G.989.2. Tamaño de trama NG-PON2 y tasa de downstream teórica	149
Tabla 36 Estudio de tasas teóricas según FEC.....	150
Tabla 37 Resultado máximos simétricos 40 Gbps sin FEC	150
Tabla 38 Resultado máximos simétricos una ONT NG-PON2 con Jumbo Frame.....	151
Tabla 39 Resultado Saturación puerto PON downstream distintos servicios	152
Tabla 40 Resultado Saturación downstream distintas calidades dos ONTs misma lambda NG-PON2	153
Tabla 41 Resultado sin pérdidas distintas calidades dos ONTs misma lambda NG-PON2	154
Tabla 42 Resultado Saturación upstream distintas calidades dos ONTs misma lambda NG-PON2	154
Tabla 43 Resultado Saturación down/up distintas calidades dos ONTs NG-PON2 y ONT GPON	156
Tabla 44 Resultado sin Saturación down/up distintas calidades dos ONTs NG-PON2 y ONT GPON.....	156
Tabla 45 Disponibilidad equipamiento NG-PON2 suministradores en España.....	164
Tabla 46 Equipamiento empleado y costes	175



Tabla 47 Salario Mensual por trabajador.....	176
Tabla 48 Salario por hora de cada trabajador.....	176
Tabla 49 Actividades y coste personal	177
Tabla 50 Presupuesto y coste total TFM.....	177

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del problema

La llegada de las nuevas tecnologías que permiten mayores velocidades de tráfico en la red del acceso fijo óptico es inminente. En España se está viviendo desde hace unos años, a pesar de la crisis económica reinante, una época de bonanza en cuanto a la instalación de accesos por fibra óptica en su denominación de FTTH (*Fiber To The Home*) y eso permite que la tendencia del mercado español se encamine a solicitar altas o cambios de los antiguos accesos de xDSL (tecnología digital sobre el bucle de abonado en todas sus vertientes) a los mencionados de fibra.

A día de hoy, la tecnología sobre la que se asientan estos accesos FTTH son de GPON (estándar G.984 [1] y G.988 [2], que indica *Gigabit Passive Optics Networks*) y ello permite que las velocidades proporcionadas para el usuario sean altísimas, del orden de 1 Gbps como algunos operadores están dando [3]. Sin embargo, esa posibilidad de dar tanto ancho de banda como se llama “vulgarmente” hace que los usuarios pidan más en sus conexiones. La consolidación del mercado español entre los operadores y la clara apuesta del mercado, y también del cliente, por la fibra óptica y sus bondades como la calidad, abaratamiento del mantenimiento, velocidades permitidas, acceso a más servicios y de mayor calidad, han hecho que los accesos de hoy en día quizás se queden cortos y sea necesario plantearse una evolución a corto plazo en la tecnología que se “monta” sobre la red de fibra.

Esta clara tendencia a dar más velocidades a los accesos de fibra a un coste parecido entre los operadores para poder dar con una gran calidad servicios como la IPTV, VoIP en HD, Internet, incluso videojuegos o servicios de seguridad en el hogar para residenciales, junto con las empresas que cada vez demandan más y más anchos de banda y más sofisticación y disponibilidad de la red en un claro enfoque por la mejora de su infraestructura TI extremo a extremo, hace que la propia tecnología de GPON se quede obsoleta, pues como se verá en el análisis del capítulo 2 donde se explicará el presente del GPON y del mercado español y por ello los problemas que se están encontrando los operadores para satisfacer la demanda de los clientes (que en parte se han provocado ellos mismos por la competencia en cuanto a anchos de banda ofertados).

1.2 Objetivos del Trabajo

En este Trabajo se abordará una posible respuesta que sigue la tendencia propuesta por los organismos internacionales como la ITU-T y la visión de negocio de los fabricantes en forma de nuevos estándares de tecnologías ópticas. En concreto se

darán dos respuestas atendiendo a la proximidad temporal de disponibilidad comercial del equipamiento diferenciando claramente entre dos estándares: XGS-PON y NG-PON2.

Estas nuevas tecnologías son y serán el futuro de la evolución marcada desde los organismos internacionales y hacia donde están orientando los esfuerzos fabricantes tan potentes como Huawei, ZTE o Alcatel-Lucent (ahora Nokia). Estas nuevas tecnologías permitirán aumentar los anchos de banda a repartir por los clientes del acceso fijo FTTH y harán posible incluso una propia segmentación a nivel físico (por longitud de onda) de los clientes en función de las necesidades.

Sin duda será un gran atractivo para el presente y futuro de las decisiones que tomen los operadores en cuanto a las inversiones pues aunque España sea un referente a nivel mundial en el FTTH [4] en cuanto al número de hogares pasados (concepto de hogar con disponibilidad de solicitar un acceso de FTTH) queda todavía un camino a recorrer en cuanto al número de clientes (accesos activos) y esos operadores deberán estar preparados para responder a las necesidades de los clientes.

1.3 Estructura del Trabajo

En este punto se pasará explicar la estructura del Trabajo para que el lector consiga situarse e ir siguiendo la evolución y las respuestas que, como objetivo del mismo, se pretenden dar a conocer.

- En el capítulo 2, como ya se ha comentado, se explicará cómo está el panorama actual español de los accesos FTTH con GPON, así como los distintos problemas a los que los operadores están haciendo frente para responder a las demandas del mercado. Además de dar una visión de casos donde España ha sido pionera mundial como la interoperabilidad que ha permitido rebajar costes y precios de los suministradores de equipamiento en beneficio de los operadores.
- En el capítulo 3 se abordará una de las soluciones mencionadas anteriormente. Se analizará el estándar, aún no descrito, del XGS-PON que ha surgido durante este año 2015 para dar respuesta a las necesidades de mayores anchos de banda por usuarios, minimizando los costes y reduciendo los períodos de espera hasta que llegue el NG-PON2. Además, se aportarán resultados de las pruebas que han podido realizar sobre un equipo de demo en los laboratorios de Telefónica (*Movistar*) en sus laboratorios para demostrar la validez de esta solución (se mostrarán resultados de tráfico de 10 Gbps simétricos) y, sobre todo, la posibilidad de convivencia con otros estándares como el GPON o el NG-PON2, algo básico para que los operadores apuesten por evolucionar la tecnología una vez que la red está desplegada. Para finalizar este apartado, se dará una visión del mercado, costes y la disponibilidad del equipamiento en al menos tres suministradores fabricantes.

- En el capítulo 4 se abordará la segunda de las soluciones planteadas donde sí aparece un estándar ya descrito y pre-publicado de la ITU-T: el NG-PON2 descrito en el G.989. Esta tecnología permite emplear distintas longitudes de onda y con ello distintas velocidades (al estándar se le denomina también 40 GPON) de hasta 10 Gbps simétricos por lambda o longitud de onda, sobre la misma ODN (*optical distribution network*, [1]) que actualmente se está desplegando en España. Se aportarán resultados de pruebas realizadas en las dependencias de Telefónica donde se han llegado a 40 Gbps, el máximo del estándar. Así como de una visión de negocio que permite esta nueva forma de trabajar con distintas longitudes de onda sobre la misma fibra. Para finalizar se dará una visión del mercado de los suministradores y períodos estimados de disponibilidad, costes y dificultades que se están encontrando los operadores para apostar definitivamente por esta solución a corto plazo.
- En el capítulo 5 se abordarán las conclusiones que marcan el objetivo final del Trabajo y que podrían servir de guía para futuras líneas de investigación. En cuanto a las conclusiones se hará especial hincapié en los beneficios de apostar por las nuevas tecnologías, los costes y por supuesto los inconvenientes que se pueden encontrar los operadores y suministradores que opten por estas tecnologías. Las líneas de trabajo que pueden surgir a partir de este Trabajo se mencionarán con algo más de detalle, pero como un primer avance destacarían: marcos de interoperabilidad, nuevos servicios o la ODN como red de transporte para otras redes de acceso.

Capítulo 2. Situación de la tecnología actual: GPON

2.1 Introducción

Como ya se expuso anteriormente, la Red de Acceso Fijo en España está sufriendo un gran cambio debido al traslado del concepto de acceso fijo por el par de cobre al acceso fijo mediante la fibra. Incluso se llega a paralizar la instalación de nuevos accesos de HFC (*Hybrid Fiber Coaxial*, donde se emplea el protocolo DOCSIS para la transmisión de la información [5]) por los nuevos de FTTH. Estos nuevos accesos permiten unos menores costes de instalación, mantenimiento, y sobre todo, unas mejoras en las prestaciones de los servicios por parte de los operadores. Los despliegues de FTTH en el mundo están tomando una gran relevancia como se advierte en el siguiente gráfico obtenido gracias a Telefónica de la reunión del FTTH Council en Varsovia donde aparecen más de 100 millones de accesos por FTTH en el mundo.

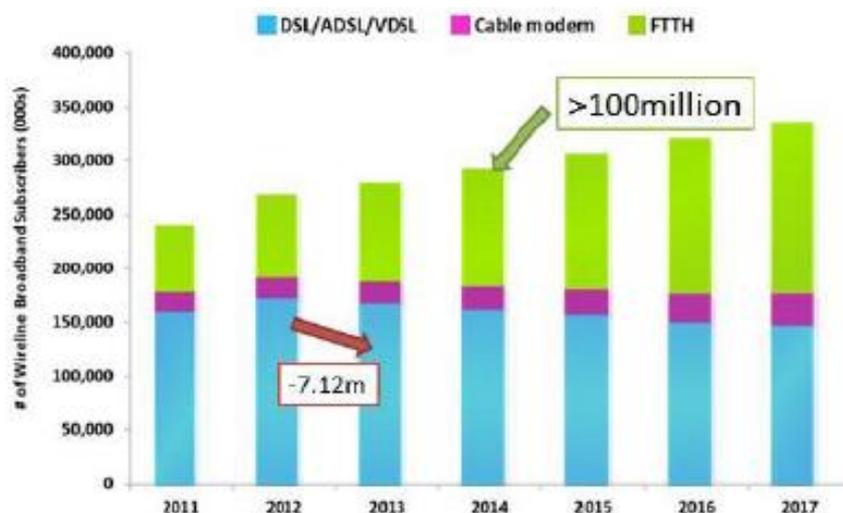


Figura 1 Distribución de clientes activos de banda ancha en el mundo

España es un auténtico referente a nivel mundial y líder a nivel europeo en cuanto al despliegue de redes FTTH, según informó el pasado abril de 2016 Telefónica en una nota de prensa [6]. España supera ampliamente los 3 millones de accesos activos FTTH y además cuenta con más de 15 millones de hogares pasados que potencialmente pueden ser clientes activos eligiendo uno o más operadores. De esta forma, el crecimiento interanual de clientes se expone como el mayor de Europa para este tipo de acceso de banda ancha.

Crecimiento interanual (1T14-1T15) de suscriptores de accesos FTTH por países (%) ^[1]

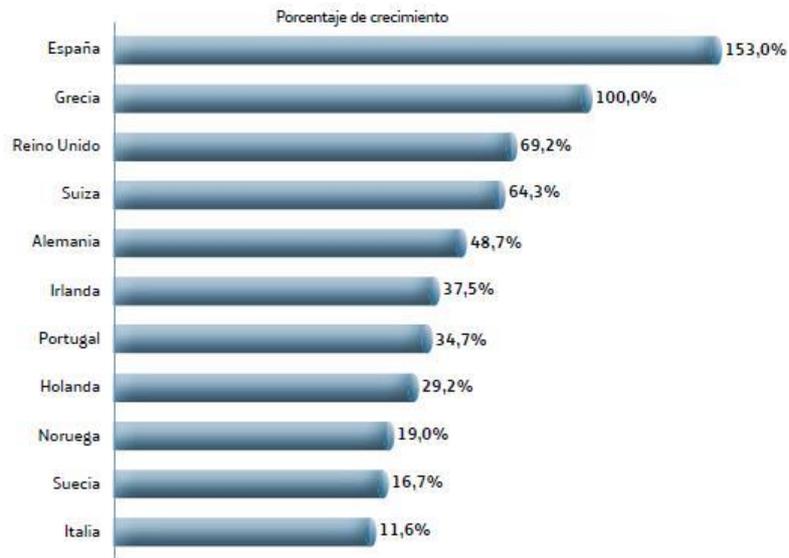


Figura 2 Crecimiento interanual de clientes de FTTH en Europa

Este incremento repercute directamente en el número de clientes con FTTH donde Telefónica es uno de los operadores que más accesos FTTH tiene en Europa, ya que España es líder en este aspecto si se desglosa un poco más el anterior gráfico.

CRECIMIENTO DE LA FIBRA ÓPTICA

► Suscriptores por países

	Trim. I 2014	Trim. I 2015	Variación (%)
1  España	749.000	1.895.000	153,0
2  Grecia	4.000	8.000	100,0
3  R. Unido	39.000	66.000	69,2
4  Suiza	140.000	230.000	64,3
5  Alemania	78.000	116.000	48,7
6  Irlanda	8.000	11.000	37,5
7  Portugal	499.000	672.000	34,7
8  Holanda	658.000	850.000	29,2
9  Noruega	510.000	607.000	19,0
10  Suecia	1.275.000	1.488.000	16,7
11  Italia	319.000	356.000	11,6

► Operadores en España

	Trim. I 2014	Trim. I 2015	Variación (%)
1 Vodafone		35.000	
2 Orange	6.000	75.000	1.150,0
3 Jazztel	25.000	211.000	744,0
4 Movistar	705.000	1.560.000	121,3
5 Otros	12.000	14.000	16,7

Figura 3 Suscriptores FTTH por países en Europa y relación de clientes en España. Fuente Analysis Manson

Sin embargo, la tecnología que actualmente está permitiendo llevar los altísimos anchos de banda que demanda el cliente es el GPON. Esta tecnología nacida a principios del nuevo milenio, impuso a otras con el G-EPON o EPON, y es lo que actualmente están usando los operadores españoles en los accesos FTTH aunque a continuación se muestre una arquitectura de red FTTH sin GPON debido a que GPON se emplea potencialmente por la eficiencia en el punto-multipunto y además posee un protocolo de control específico entre OLT y ONT, mientras que G-EPON o EPON trabajan sobre líneas de fibra punto a punto e incluso punto-multipunto, pero ambas con protocolos de nivel Ethernet, sin tener otros propietarios como el GPON. Se puede observar que G-EPON se fundamenta en las mismas bases que el GPON. Esas bases responden a servicios variados para clientes de distintas características, pero siempre pensando en un ancho de banda mucho mayor que lo pueden ofrecer tecnologías como el ADSL, por ejemplo.

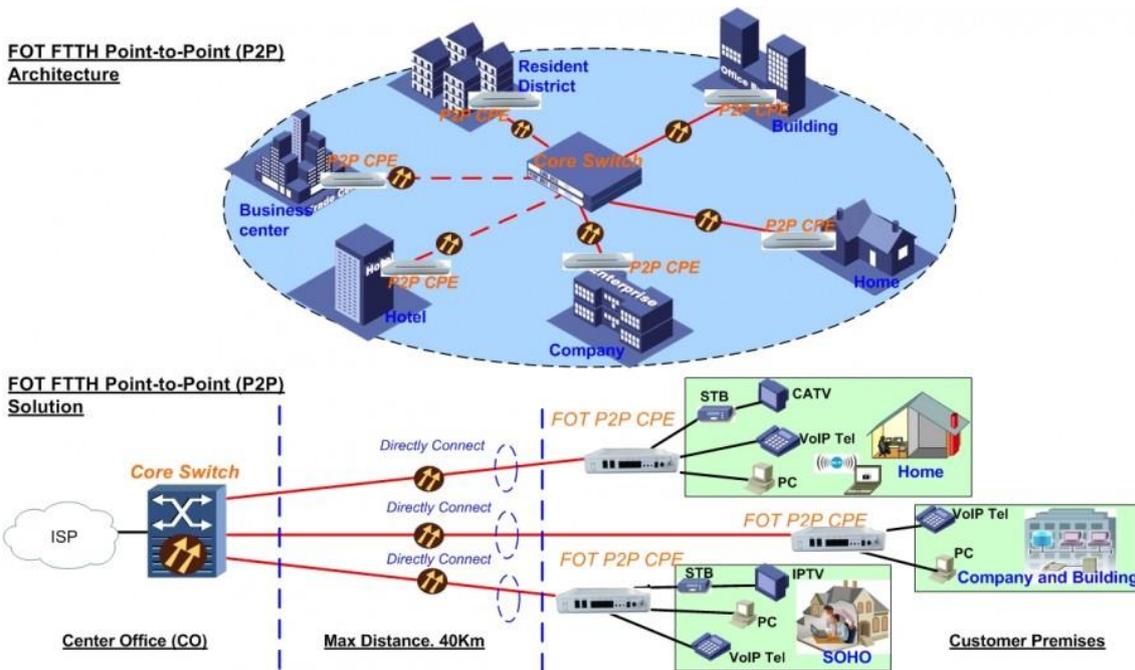


Figura 4 Arquitectura FTTH sin GPON obtenida de <http://www.fiberoptictel.com/>

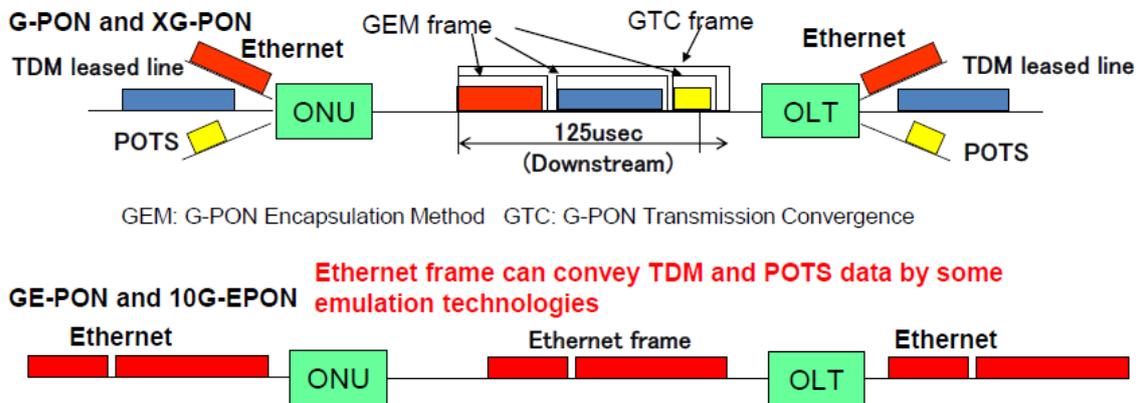


Figura 5 Diferencia tramas y protocolos empleados entre GPON y GE-PON gracias a NTT

Como se puede comprobar en la figura anterior, en GE-PON se envía el tráfico directamente como trama Ethernet, pero en GPON se introduce la trama Ethernet como *payload* en una trama *GEM frame* que a su vez forma parte de una global llamada *GTC frame* que ocupa 125 microsegundos. Esta es una de las principales diferencias entre una tecnología y otra.

No obstante, a continuación, se pasará a explicar las características fundamentales de la tecnología GPON que servirá para preparar las explicaciones pertinentes en las que se basarán los porqués de su inminente evolución.

2.2 ¿Qué es el GPON?

El GPON es una tecnología sustentada en la comunicación entre una central (OLT, *Optical Line Termination*) y una ONT (*Optical Network Termination*, también llamada ONU, *Optical Network Unit*, y que durante el documento se llamarán indistintamente aunque la diferencia esencialmente supone que la ONU engloba en su término varios tipos de ONTs sean residenciales, empresa, modulares, etc) que se encuentra en la casa del cliente principalmente, empleando una fibra óptica como medio de transporte y donde se emplea la multiplexación en un longitud de onda de tal forma que sobre la misma fibra se incorporan el enlace ascendente y descendente. El tendido de fibra óptica entre OLT y ONT se denomina ODN (*Optical Distribution Network*).

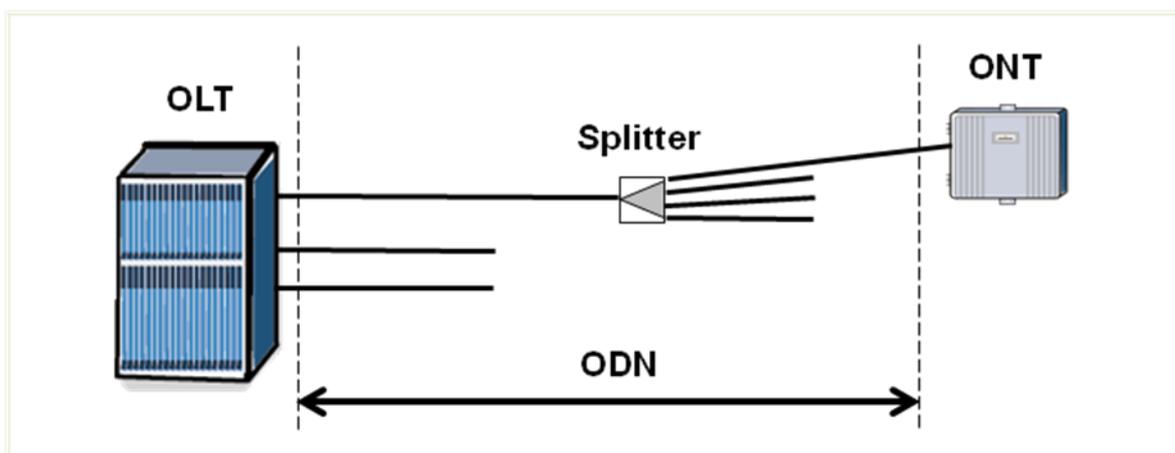


Figura 6 Elementos de una Red GPON

A su vez la ODN se puede diferenciar en varias redes o partes atendiendo a la aparición de elementos de splitting o divisores ópticos que permiten derivar una única fibra óptica que saldría del puerto PON (de la central) en 64 o 128 fibras que irían cada una hasta la casa de los clientes.

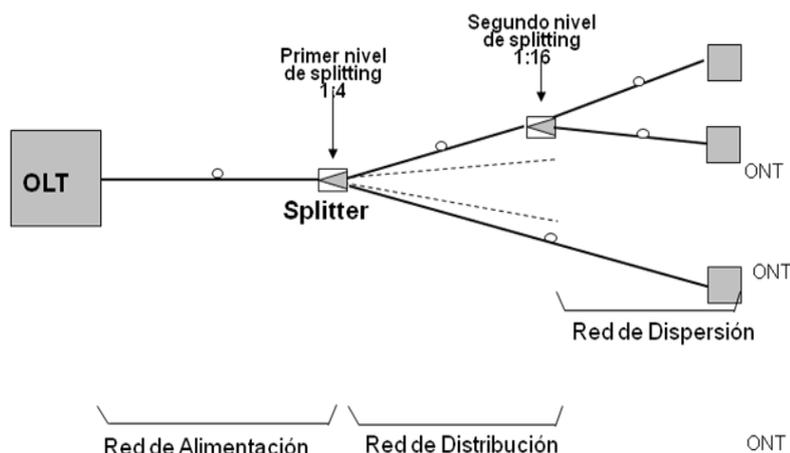


Figura 7 Arquitectura física de una ODN

Las longitudes de onda empleadas para su funcionamiento y que se recogen en el estándar G.984.3 [7] son las que se muestra en un gráfico a continuación donde se puede observar un cierto bloque desde 1290 nm hasta 1330 nm para el upstream y 1480 a 1500 nm para el downstream. Ello permite que la exigencia de los filtros y receptores ópticos sea menor, aunque típicamente se trabaja a 1310 nm para el upstream y 1490 nm para el downstream.

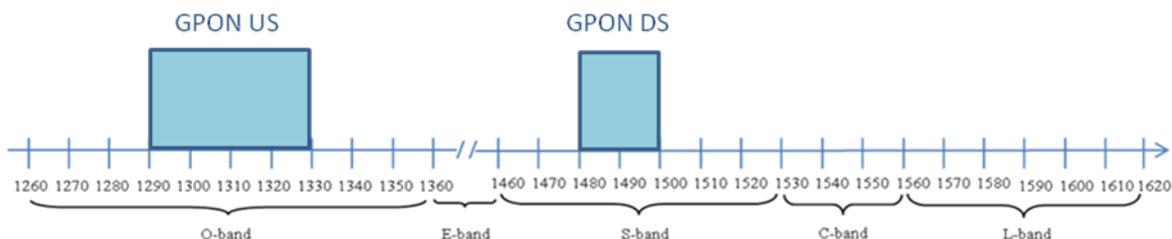


Figura 8 Distribución de longitudes de onda para GPON usado en España

Adicionalmente y como se muestra recogido en el estándar de GPON serie G.984, aparece una tercera longitud de onda que sólo se emplea en sentido downstream y que se planteó para llevar el tráfico de vídeo que es un servicio eminentemente de difusión o de tipo broadcast. Sin embargo, la complejidad de operar “*on-demand*” sobre ello y de poder filtrar contenidos (según la cantidad de canales que aparezcan en las modalidades del contrato del cliente) ya que los mismos vendrían en distintas frecuencias, hicieron que se descartara su uso en España. La longitud de onda mencionada para el vídeo daría el siguiente esquema donde aparece el nombre de RF pues desde la ONT se daría el contenido de vídeo broadcast por el puerto coaxial que podría tener y que se denomina también RF. Actualmente no se están vendiendo en España este tipo de ONT:

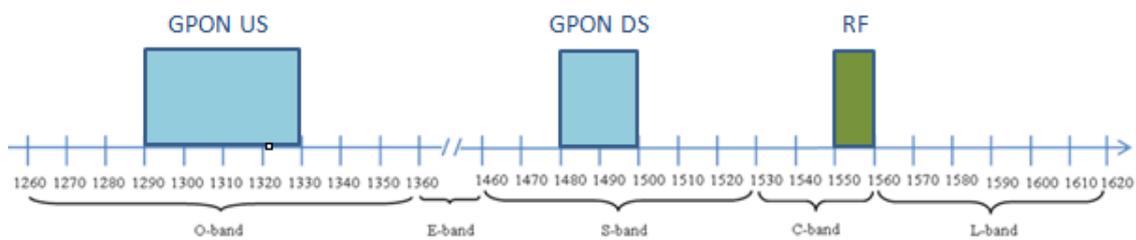


Figura 9 Distribución de longitudes de onda para GPON según estándar G.984.3

La forma en la que se gestiona la gestión entre OLT y ONT se corresponde con un estándar propio del GPON llamado OMCI [2] para la configuración de los servicios, de sus puertos Ethernet, gestión de alarmas y consultas de diagnóstico, principalmente. Además de la capa PLOAM [7] que permite a la OLT y a la ONT sincronizarse a nivel óptico. No es objeto del presente Trabajo detallar la forma en la que ambos equipos se sincronizan gracias al envío de identificadores, intercambio de claves de encriptación, algoritmos para el *ranging* o nivelación de potencia, secuencia de mensajes de OMCI para la configuración y gestión de los equipos, pero sí es importante destacar los siguientes aspectos que harán que el lector comprenda más fácilmente la forma de trabajar de esta tecnología.

La arquitectura de una red de acceso con GPON es en estrella donde la OLT a través de un puerto llamado “puerto PON” conecta mediante una fibra que se divide gracias a un divisor óptico o splitter, hasta 64 ONTs distintas (aunque hay posibilidad de trabajar con 128 ONTs por puerto PON). En esta única fibra se emplea la multiplexación por longitud de onda o WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) para dividir los dos sentidos de tráfico entre OLT y ONT. Por tanto, de esta forma sólo se emplea una fibra para los dos sentidos del tráfico, haciendo más fácil y eficiente el despliegue físico.

- Cada ONT se identifica por un *serial number* que es único y que permitirá a la OLT conocer qué configuración debe enviarla para que se configure correctamente y funcione. El operador cargará una serie de comandos en la OLT que permitirá la configuración de los servicios en la ONT una vez se conecta la fibra y se haya sincronizado con la OLT
- En términos de estándar, una ONT puede estar situada a 20 Km como máximo, sin embargo, la realidad es otra y debido fundamentalmente al nivel de *splitting* con los que se trabaja, del orden de 1:64, a los empalmes que hay que realizar para el tendido de fibra, pérdidas por conectores, potencia óptica transmitida, pérdidas debido al paso de la luz por la fibra y la sensibilidad de los receptores ópticos, las ONTs suelen estar conectadas hasta un máximo de 8 Km. A continuación, se muestra un estudio realizado para valores máximos en cuanto a atenuación, pérdidas por empalmes, conectores, y nivel de *splitting* que muestra como con dos niveles de división de 1x4 y de 1x16, completando el

1:64 mencionado. La atenuación debida a este último factor es la más importante de cara al estudio final del balance óptico del sistema.

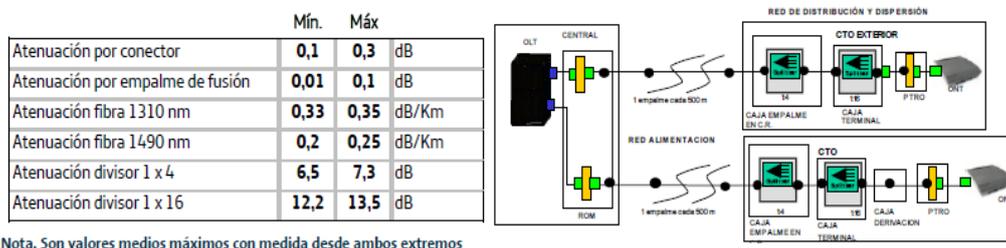


Figura 10 Estudio con tablas de atenuaciones y arquitectura de un tendido FTTH

Donde se dimensiona con empalmes en la fibra entre central y cajas de empalmes cada 500 metros y donde se establece un máximo de 26 dB de pérdidas dejando 2 dB para la acometida final en la casa del cliente. La fibra empleada es monomodo con baja sensibilidad a curvaturas, para la Red de Acceso: ITU G.652 [8].

Cable attributes		
Attribute	Detail	Value
Attenuation coefficient (Note 1)	Maximum from 1310 nm to 1625 nm (Note 2)	0.4 dB/km
	Maximum at 1383 nm ±3 nm (Note 3)	0.4 dB/km
	Maximum at 1550 nm	0.3 dB/km

Tabla 1 Características de la fibra G.652.D de la tabla 4 del estándar G.652 de la ITU-T

- Los rangos ópticos para trabajar con equipamiento de GPON que recoge el estándar G.984.2 [9] son los siguientes (los fabricantes suelen trabajar en B+ o C+, siendo más caros los láseres de tipo C+). Que muestran una relación con el estudio mostrado unas líneas antes.

	Clase A	Clase B	Clase B+ (G.984.2 Amd1)	Clase C	Clase C+ (G.984.2 Amd2)
Pérdidas mínimas	5 dB	10 dB	13 dB	15 dB	17 dB
Pérdidas máximas	20 dB	25 dB	28 dB	30 dB	32 dB

Tabla 2 Láseres recogidos por estándar G.984.2 para OLT y ONT

- Cada puerto PON puede trabajar a 2.5 Gbps en sentido downstream y 1.25 Gbps en sentido upstream como máximo, aunque los valores exactos se exponen un poco más adelante. Esos valores de ancho de banda son repartidos entre los usuarios que reciben o envían tráfico.
- En una OLT puede haber varios puertos PON integrados en una tarjeta llamada LT o tarjeta de línea. Esas tarjetas se integran en un chasis y dependiendo del fabricante puede haber incluso 16 tarjetas. A su vez, la OLT debe tener al menos un slot donde integrar unas tarjetas de red o NT (también llamada controladora por algunos fabricantes) que se conectarán a la red de Agregación que servirá de unión con la red de Transporte o Core.
- El entramado empleado entre OLT y ONTs es la trama GTC que se muestra a continuación.

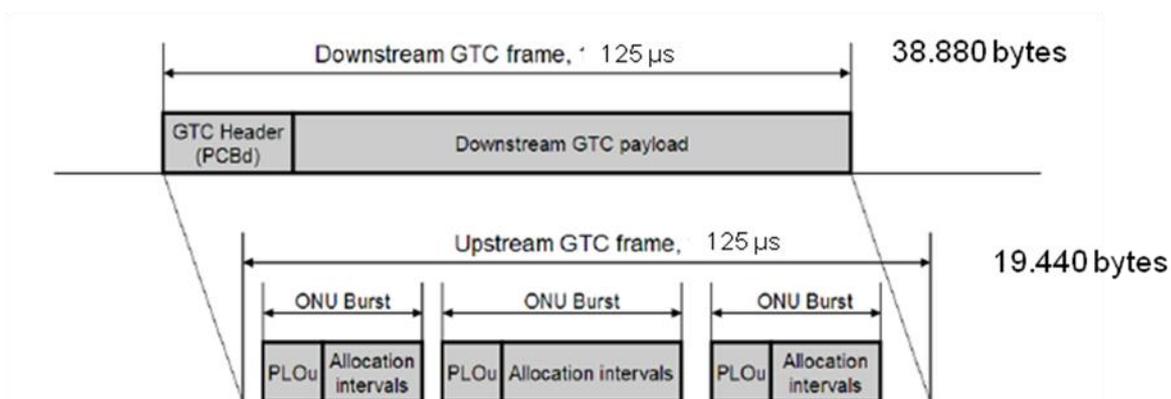


Figura 11 Ilustración 8-1 del estándar G.984.3 donde se observa el entramado GTC

En ella se ven cómo se van integrando distintas tramas GEM. Mientras que entre la Red de Agregación y la OLT se envían tramas Ethernet sin ningún tipo de protocolo que las encapsule como sí ocurre en el lado GPON.

- La trama GTC de downstream serán 38880 Bytes enviados cada 125 microsegundos para obtener 2488,32 Mbps totales. Cada trama GTC se divide en una cabecera y un payload que lleva una o varias tramas GEM.

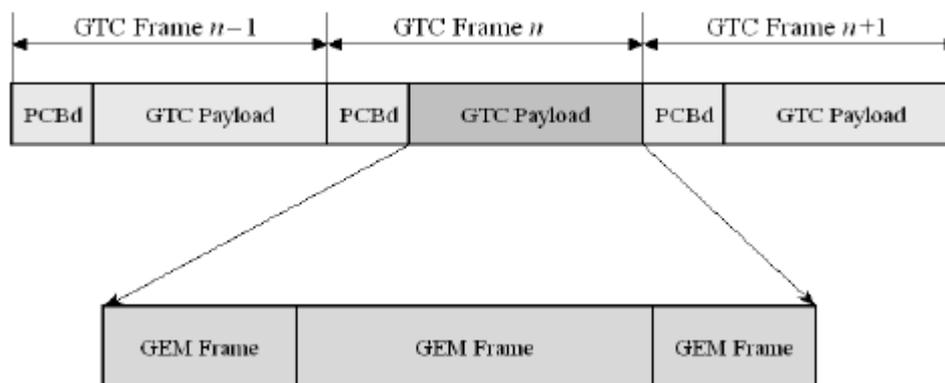


Figura 12 Ilustración 8-2 del estándar G.984.3 donde se observa un ejemplo de trama GTC downstream

La cabecera de la trama GTC se divide en los siguientes campos que no serán objeto de estudio, pero sí se resalta que uno de ellos es vital para el funcionamiento del upstream: BWMAP (se explicará más adelante).

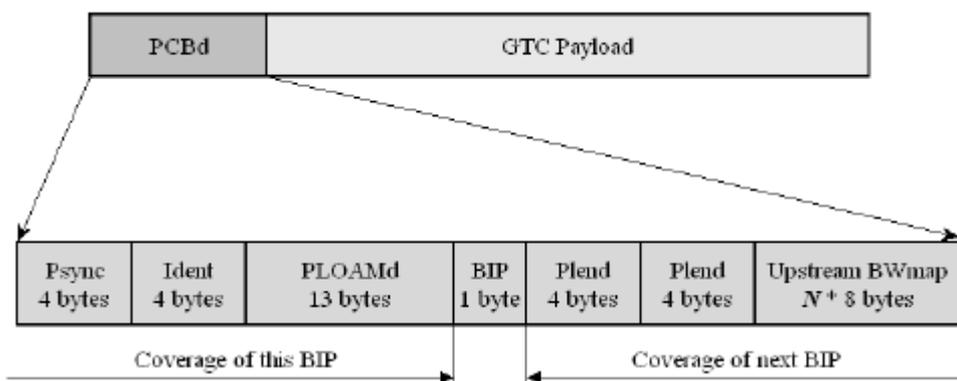


Figura 13 Ilustración 8-3 del estándar G.984.3 de los campos de la cabecera de trama GTC

- Las tramas GEM son bloques de bytes de datos (cabecera Ethernet, cabecera IP y datos IP como payload de un paquete Ethernet) que llevan una cabecera de 5 Bytes donde aparece el identificador GEM o también llamado GEM Port.
- El GEM Port identifica el servicio que se ha configurado en cada ONT. Es un identificador lógico que permite en esta arquitectura punto – multipunto, a las ONTs y a la OLT discernir el tráfico enviado entre ellos. El GEM Port será típicamente bidireccional y existirán desde el identificador 0 al 4095, estando los identificadores desde el 4065 al 4095 reservados para uso de tráficos de características particulares como el multicast (donde se envía el tráfico de canales IPTV cuando no son *Video On Demand*).

- A su vez, uno o varios GEM Ports llevarán asociados un TCONT o *Transmission Container*. Este “contenedor” no es más que el intervalo de bytes donde cada ONT tiene permitido enviar. Para que no haya conflictos entre los distintos envíos de las ONTs, éstas reciben la distribución en el campo de cabecera antes mencionado BW MAP.

MAP	MAP517 - 16 Bytes
MAP	MAP773 - 32 Bytes
MAP	MAP6 - 16 Bytes
MAP	MAP262 - 176 Bytes
SSTOP	1391
Send PLOAMu	False
Use FEC UP	False
Alloc ID	262
Send DBRu	Mode0
CRC Ok	True
SSTART	1216
MAP	MAP518 - 16 Bytes
MAP	MAP774 - 32 Bytes
MAP	MAP7 - 16 Bytes
MAP	MAP263 - 176 Bytes

Figura 14 Ejemplo de BWMAP enviado hacia las ONTs

- Donde se informa a cada una de cuándo deben enviar para que la OLT, además de por el GEM Port, sepa identificar bien el tráfico procedente de cada ONT. Como se puede comprobar en la figura anterior, el envío de tramas de cada ONT se muestra espaciado y rafagado pues depende de cuándo dé permiso la OLT. Por ejemplo, la ONT que tenga el Alloc ID 262 tiene 176 Bytes para transmitir en una trama desde el Byte 1216 al 1391. El Alloc ID es el identificador del TCONT o slot empleado para la subida y lo que variará será la longitud en Bytes dada para el envío. En sentido downstream no existe este concepto pues la OLT sabe cuándo hay que enviar.
- El ancho de banda de upstream máximo viene dado por los 19440 Bytes que como máximo se pueden transmitir en este sentido del tráfico por cada 125 microsegundos y ello dará 1244,16 Mbps.
 - En un puerto PON existe un mecanismo llamado *Rogue ONT Detection* que permite desactivar cualquier ONT que envíe en un intervalo que no es el suyo y que estaría “silenciando” a otra ONT consecutiva en cuando al turno de envío. Este mecanismo es muy importante porque no todas las ONTs están a la misma distancia, ni envían o reciben con la misma potencia, ni tienen la misma temperatura de láser, ni el mismo envejecimiento, etc. La OLT envía el BW MAP con rangos de Bytes de silencio, llamados Bandas de Guarda, que permiten acomodar el envío de las ONTs y ser flexibles antes de desactivar una ONT por suplantación del slot de envío.

- Las ONTs trabajan en un rango de pérdidas de alrededor de 28 dB siendo el valor de sensibilidad de unos -28 a -30 dBm en casos comerciales. A continuación, se muestran casos reales comerciales estudiados en Telefónica.

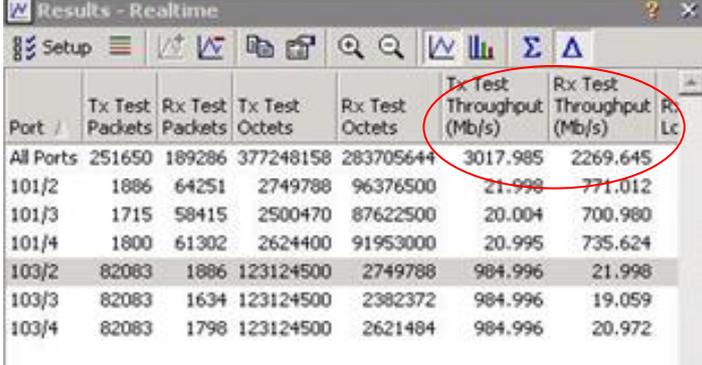
	Clase A	Clase B+	Clase C	Clase C+
Potencia Media Mínima (OLT)	0 dBm	+1,5 dBm	+3 dBm	+3 dBm
Potencia Media Máxima (OLT)	+4 dBm	+5 dBm	+7 dBm	+7 dBm
Sensibilidad (ONT)	-21 dBm	-27 dBm	-28 dBm	-30 dBm
Saturación (ONT)	-1 dBm	-8 dBm	-8 dBm	-8 dBm

Tabla 3 Casos de instalaciones reales con láseres de distinto tipo en downstream

	Clase A	Clase B+	Clase C	Clase C+
Potencia Media Mínima (ONT)	-2 dBm	+0,5 dBm	+2 dBm	+0,5 dBm
Potencia Media Máxima (ONT)	+3 dBm	+5 dBm	+7 dBm	+5 dBm
Sensibilidad (OLT)	-23 dBm	-28 dBm	-29 dBm	-32 dBm
Saturación (OLT)	-8 dBm	-8 dBm	-14 dBm	-12 dBm

Tabla 4 Casos de instalaciones reales con láseres de distinto tipo en upstream

- Para poder trabajar a tasas tan altas y a distintos valores de potencia óptica (cercanos a los valores de sensibilidad) la mayoría de operadores exigen el uso de mecanismos de corrección de errores. En el GPON se usa el FEC (*Forward Error Correction*) de tipo Reed-Solomon con palabras código de (255, 239) con 16 Bytes de paridad [10] que hacen que el throughput final sea un poco menor de los máximos establecidos por el estándar. En pruebas de laboratorio en Telefónica en marzo de 2012 se observaron valores máximos en términos de saturación de tráfico en un puerto PON de 1 Gbps en upstream y de 2.2 Gbps en downstream lo que supone una eficiencia del 88% (sin FEC se observan unos 2.4 Gbps en downstream).



Port /	Tx Test Packets	Rx Test Packets	Tx Test Octets	Rx Test Octets	Tx Test Throughput (Mb/s)	Rx Test Throughput (Mb/s)	Rc Lc
All Ports	251650	189286	377248158	283705644	3017.985	2269.645	
101/2	1886	64251	2749788	96376500	21.998	771.012	
101/3	1715	58415	2500470	87622500	20.004	700.980	
101/4	1800	61302	2624400	91953000	20.995	735.624	
103/2	82083	1886	123124500	2749788	984.996	21.998	
103/3	82083	1634	123124500	2382372	984.996	19.059	
103/4	82083	1798	123124500	2621484	984.996	20.972	

Figura 15 Tasa máxima downstream con FEC activado en puerto PON.

Esta rebaja es significativa, pero previene de errores de bit provocados en la fibra por atenuaciones, derivas del slot de envío, etc y con ello, la calidad percibida por el usuario es muy alta y hará posible que no haya tantas pérdidas como por ejemplo puede ocurrir en la televisión donde se producirían pixelaciones. Este uso del FEC será muy importante en los apartados 3.2 y 4.3 donde se expondrán los resultados de las demos con tecnologías XGS-PON y NG-PON2.

- La ONT normalmente no tiene funciones de encaminamiento ni IP. Es decir, no es un router de cliente o *Home Gateway* (o también llamado CPE, *Customer Premise Equipment*, aunque esto se aplica a todo equipamiento de cliente, más que sólo al router), sólo es un equipo de red que se encuentra en casa del cliente y tiene como función convertir la señal óptica del GPON en eléctrica y enviar el tráfico hacia un router de cliente que sí tendrá todas las capacidades necesarias para dar servicios como internet, IPTV, VoIP, gaming, etc. Además de enviar al router, podrá recibir el tráfico del mismo y encapsular en tramas GEM hacia la OLT. Actualmente hay ONTs que llevan incorporado el router en su hardware (HW) y que se denominan HGU (*Home Gateway Unit*) y donde España es pionera en su uso y prestaciones.
- La OLT sí tiene funciones de encaminamiento, protocolo RIP, filtros de seguridad, contadores de tráfico, trabajará con VLANes, filtrará a nivel IP distintas redes y sobre todo, podrá gestionar ingentes cantidades de tráfico entre los usuarios y la red donde se encuentren los servidores de contenidos [2]. Este punto es importante y será objeto de análisis en el apartado 2.4.

En este punto es importante destacar el comportamiento y uso del TCONT. Como se ha visto unas líneas antes, el TCONT es un identificador en términos de Bytes donde la ONT (recuérdese el término Alloc ID) puede enviar el tráfico que tenga en el buffer esperando a ser enviado. En la configuración de un TCONT no se detalla exactamente

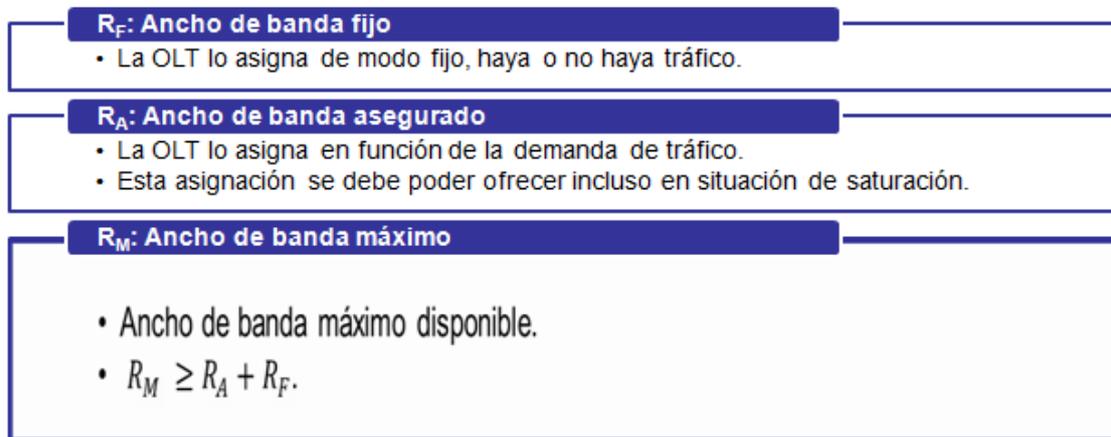
ese número de Bytes sino que se trabaja en términos de velocidades binarias y es la OLT mediante algoritmos como [7]:

- **Status Reporting DBA** (SR-DBA) que es un método de asociación dinámica del ancho de banda mediante mensajes que reportan las ONTs sobre la ocupación de su buffer.
- **Traffic-Monitoring DBA** (TM-DBA) que es un método, también dinámico, para la asociación del ancho de banda requerido por cada ONT para poder enviar basado en un complicado algoritmo de observación de tramas GEM vacías desde los clientes.

Se use el método que sea y en función de lo configurado mediante comandos en la OLT, ésta conoce la cantidad de datos y la velocidad que demanda cada ONT e informará de ello a todas. Es por eso que en los operadores se configuran unos valores o perfiles de tráfico para el upstream de los clientes. Los famosos 300 Mbps en este sentido del tráfico no son más que una línea de comando que define un valor de ancho de banda fijo, asegurado y por último uno máximo, llamados R_F , R_A y R_M , respectivamente:

- Existe un valor establecido por cada fabricante para cabeceras, bandas de guarda y protocolo OMCI de tal forma que están fuera de toda asignación dinámica posible.
- El valor de asegurado fijo es un ancho de banda que no se reparte entre todas las ONTs, que siempre está guardado para el servicio donde se ha configurado para una ONT. Es el R_F . Por ejemplo, un perfil de Internet para una ONT X creado con $R_F = 1$ Mbps significa que de los 1.25 Gbps nominales con los que trabaja el puerto PON, 1 Mbps no se podrá usar para dar más velocidad a otro cliente que lo demande si es que la ONT X está apagada. En este punto habría un ancho de banda fijo más un asegurado fijo que no se emplearían para la asignación dinámica DBA.
- El valor de asegurado dinámico es un ancho de banda que en caso de no ser usado, se reparte entre las demás ONTs de un puerto PON que demanden slots para poder enviar con más ancho de banda (siendo su límite el máximo del perfil de TCONT configurado). Se denomina R_A . Se podrá dar incluso en casos de saturación.
- El valor máximo se denomina R_M y es el que correspondería a los 300 Mbps que se ofertan al cliente, por ejemplo. Es un valor máximo y por tanto puede no darse en casos de congestión. Aunque siempre se intentará dar el valor asegurado, el máximo se irá dando en función de las ONTs que estén conectadas, de los perfiles configurados para todos los servicios que tengan,

de la congestión, etc. La posibilidad de dar valores máximos con mayor facilidad para cada cliente será un motivo por el que se pueda empezar a pensar en otras tecnologías que permitan mayores anchos de banda en el upstream como se verá en posteriores capítulos.



Regla para la provisión de TCONTs

$$\sum_i (R_F^i + R_A^i) \leq C$$

Figura 16 Resumen de tipos de Anchos de banda y Regla de Provisión

Finalmente, el resultado de usar esos perfiles de TCONT exigirá a la OLT llevar un control de los anchos de banda de cada cliente, permitirá una aplicación directa de QoS o Calidad de Servicio, pues a servicios en tiempo real como la VoIP o IPTV será conveniente usar valores de ancho de banda asegurados = máximos para que no haya pérdidas de tráfico e incluso para que esté rápidamente disponible un slot de envío suficiente al estar siempre fijo y no dinámico para uso en otras ONTs y en otros servicios. Esa forma de trabajar con distintos anchos de banda para el TCONT se recoge en el estándar G.984.3 [7] y comprende varios tipos o *Types* siendo los más usados, y sin entrar más en detalle de los demás, los siguientes:

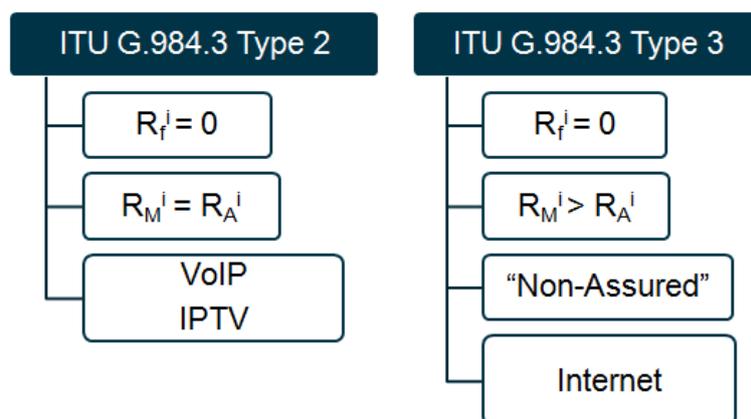


Figura 17 Resumen de tipos de TCONT empleados de forma comercial

Por tanto, llegados a este punto se puede entrever que el GPON es una tecnología compleja que depende de muchos factores y que a lo largo del tiempo ha sufrido distintas variaciones para poder llegar a dar las tasas de tráfico que el mercado ha impuesto y que ahora demandan los clientes. Cada operador ha decidido trabajar con uno o varios suministradores de equipamiento de GPON y ha decidido configurar y/o trabajar con distintos servicios sobre la red de GPON. Esta tecnología permite sin problemas trabajar con retardos muy bajos y con calidades de servicio en el tramo de OLT – ONT. Además, al ser equipos que concentran gran cantidad de tráfico permiten una gestión del tráfico rápida y eficiente con algoritmos de QoS en sus colas para evitar la congestión de servicios prioritarios como IPTV o VoIP.

Sin embargo, aunque no todos los operadores actúan igual, sí es cierto que todos están convergiendo a unas tasas muy parecidas que hacen que la disputa en la cartera de clientes llegue a términos de precios y de servicios añadidos. A continuación, se describe la situación del mercado español que servirá para conectar con lo explicado en este apartado con el fin de que el lector entienda los problemas que ya se están observando en los despliegues del GPON actual.

2.3 Situación del mercado actual español

El mercado español actual se ha caracterizado por el empuje en las inversiones de los operadores para poder llegar a cuantos más clientes mejor. Con Telefónica (Movistar) a la cabeza de las inversiones se ha llegado a un marco competitivo donde el regulador nacional, la CNMC (Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia), ha jugado un papel importante en la obligación de ciertas medidas que harían que los operadores con menos ritmo inversor en instalaciones se beneficiarían de lo ya

desplegado. De esta forma se tiene la siguiente cuota de mercado y de hogares pasados donde hay posibilidad de pedir un acceso activo de FTTH [11].

45. Líneas de banda ancha fija por tecnología y por operador (IVT 2015)

	FTTH
Movistar	2.221.315
Orange	808.869
Vodafone	67.438
Euskaltel	0
R	3.197
TeleCable	10.208
Resto	5.797
Total	3.116.824

Los datos de Vodafone incluyen los de Ono y los de Orange incluyen los de Jazztel.

Tabla 5 Datos Líneas FTTH minorista por operador cierre 2015

14. Líneas de banda ancha fija por tecnología y por operador

	Dic-2015	Ene-2016	Feb-2016	Mar-2016
FTTH	3.113.580	3.266.742	3.423.858	3.583.174
Movistar	2.221.315	2.293.474	2.371.787	2.456.468
Otros	892.265	973.268	1.052.071	1.126.706

Tabla 6 Datos Líneas FTTH minorista generales diciembre 2015 – marzo 2016

Como se puede comprobar Telefónica (Movistar) es el operador que más clientes activos tiene en una tecnología en alza como es la FTTH (casi 2.5 millones de clientes activos lo que supone casi el 70% de cuota de mercado). Comparando las dos tablas anteriores se puede observar que de diciembre 2015 a marzo de 2016 el número de clientes totales ha aumentado en casi 500000 líneas, mostrando de esta forma la relevancia que tiene actualmente el acceso de banda ancha fija por FTTH en nuestro país.

Este modelo de mercado ha visto de esta forma la llegada de ofertas minoristas, mayoristas y de empresas que se han ido diferenciando en cuanto a las velocidades ofertadas, costes y precios. A continuación, se muestran los distintos actores y sus ofertas en términos de anchos de banda en este mercado español [12] (no se ponen

tarifas de empresas o de NEBA aunque corresponderían con anchos de banda parecidos a los residenciales para los primeros, y para los segundos, el máximo está en 30 Mbps en bajada y subida alrededor de 3 Mbps).

Orange / Jazztel		Movistar	
Bajada (Mbps)	Subida (Mbps)	Bajada (Mbps)	Subida (Mbps)
300	300	300	300
200	200	300	30
30	30	50	50
50	5	30	30
20	2,5	30	3

MasMovil		Vodafone	
Bajada (Mbps)	Subida (Mbps)	Bajada (Mbps)	Subida (Mbps)
300	300	300	300
50	5	300	30
		50	5

Tabla 7 Resumen de Velocidades ofertadas sobre FTTH en el sector español

Por tanto, se puede observar cómo a medida que la competencia se hace más fuerte porque aumentan sus instalaciones propias habiendo llegado más tarde que Telefónica (Movistar) al mercado del FTTH, porque la oferta de contenidos es más variada con los OTTs (*Over The Top*) apretando el mercado (como Netflix) y porque los precios son más bajos gracias a las ofertas convergentes (suma de móvil, fibra, TV, fijo en una misma factura y modalidad), los operadores se ven obligados a:

- Ofrecer mayores anchos de banda a cada cliente
- Contenidos de calidad y personalizados como la televisión bajo demanda (VoD)
- Videojuegos online como servicio adicional para generar un quintuple Play (cinco servicios).
- Mejorar la seguridad y privacidad de los datos y tráfico cursados.
- Acceso a contenidos con bajo retardo y alta calidad.
- Abaratar los costes por equipamiento y reducir el número de averías
- Reducir el tiempo de calidad de la demanda o tiempo de instalación de las acometidas y accesos FTTH

- Mejorar el equipamiento, por ejemplo el Wifi, para que lleguen a tasas de tráfico cada vez mayores empleando estándares como el 802.11ac que permite tasas de incluso 1 Gbps en ciertas condiciones [13].
- Permitir conectar cada vez más equipos
- Competir con las tasas que las tecnologías móviles ofrecen (*LTE Advanced*)

El escenario o arquitectura que se emplea en España a nivel general en los operadores responde a la siguiente ilustración. Como se podrá observar el nodo de acceso OLT convergen todos los servicios que demandan todas las mejoras y requisitos que se han descrito a lo largo de los apartados anteriores.



Figura 18 Arquitectura típica Triple Play Servicios sobre cliente residencial

Todo ello ha obligado a que en España se produzcan los siguientes hitos antes que en otros países tan avanzados en FTTH como Corea del Sur o Japón y que han hecho que el mercado español sea tan atractivo para los fabricantes, e incluso para los operadores.

- Definición del *Nuevo Servicio de Ethernet sobre Banda Ancha*, conocido como NEBA, que fue formalmente descrito y publicado en julio de 2015 [14] por la CNMC para dar servicios a mayoristas. Este nuevo servicio significó la posibilidad de que otros operadores (mayoristas) mediante enlaces virtuales de nivel 2 o Ethernet (VLAN) pudieran acceder a los equipos de red GPON desplegados por el operador Telefónica para evitar tener que desplegar toda la red como sí hizo el operador citado. Lo único que tendrían que aportar a la conexión del cliente sería un router con capacidad de trabajar con multi-vlan y con múltiples calidades de servicio a nivel Ethernet, también llamados bits de prioridad 802.1p que no son más que tres bits que se encuentran en las cabeceras establecidas por el estándar 802.1q donde se describe el uso de

VLAN en el tráfico Ethernet [15]. De esta forma, la red de GPON se convertía en un mero elemento de transporte para llevar la comunicación desde la red del operador mayorista hasta el hogar del cliente y por ello pagaría una cuota de acceso a Telefónica por usar su fibra ya desplegada.

- **Mejora dinámica de la latencia en GPON.** En países como Taiwán existen distintas opciones de contrato que permiten a los clientes pagar un plus para tener un retardo mínimo en la red de acceso por GPON. Actualmente los fabricantes pueden obtener un rendimiento del retardo dinámico o estático para las conexiones de cada usuario en el upstream. Ya se explicó que la OLT otorga slots de envío, por tanto, una forma de mejorar el rendimiento es dotando de más frecuencia esos bytes permitidos para poder transmitir. En España esa mejora no se cobra.
- **Interoperabilidad.** En España se consiguió a mediados de 2009 que ONTs de distintos fabricantes pudieran sincronizarse con una OLT de otro fabricante y operar de forma correcta los servicios de un operador de telecomunicaciones. Este extremo permitió dar fuerza al operador y hacer que los suministradores compitieran en precios y además, que forzarán una configuración basada lo máximo posible en el estándar pero también a los servicios proporcionados por dicho operador. El organismo internacional que siempre ha abogado por esta posibilidad de interconexión es el FSAN (*Full Service Access Network*) foro auspiciado por la ITU-T. Se ha intentado en muchos países sin éxito.
- **Módulo ONT + Router.** Hace cinco años se pensó en la posibilidad de integrar las funcionalidades de ONT y de router en una misma caja que estuviera en la casa del cliente con el fin de reducir el número de equipos y el consumo eléctrico, además del número de cables. Actualmente, el despliegue más empleado por los operadores españoles es el siguiente:



Figura 19 HGU de Movistar. Imagen de xatakamovil.com

Y desde mediados del año 2015 ya se encuentran disponibles equipos de fabricantes chinos sobre todo que integran el módulo óptico del GPON sobre

un HW con posibilidades de trabajar como un router con el wifi incorporado además. Hay distintas variantes, pero lo más importante es que este paso ha permitido, junto con la interoperabilidad, forzar una política de precios agresiva para que el operador pueda elegir un equipo más barato con el fin de reducir los costes por instalación.

- **La Red de Acceso GPON como “Red de Transporte”**. O lo que es lo mismo, que el GPON se emplee como backhaul móvil. El pasado año 2015 en pruebas de laboratorio se consiguió una configuración de OLT y ONT eficiente en términos de ancho de banda, conectividad y retardo, para poder conectar una Small Cell a una ONT. De tal forma que la propia fibra de GPON permitiría ser el medio de transporte que conectara la red de datos y telefonía móvil a un elemento como el ya mencionado (Small Cell) que permitiera telefónica, conexiones de UMTS y de LTE. Esto abriría una vía interesante de negocio ya que se emplearía el árbol de fibra ya desplegado para poder instalar en puntos estratégicos ONTs donde se conectara este equipo de radio enlace que permitiera una conexión más directa y más cercana a los usuarios de telefonía móvil de tal forma que mejoraría la capacidad del enlace y la cobertura.

2.4 La obsolescencia del GPON en España

En este apartado se describirán los motivos por los que el GPON se está quedando corto para poder otorgar una respuesta efectiva a los operadores españoles de acuerdo con:

- Las demandas de servicios y de anchos banda por parte de los clientes.
- Impacto económico que supone el despliegue de la red de GPON que implica que cualquier futura mejora pueda reutilizar el despliegue que se está haciendo actualmente.
- La mejora de las Redes de Agregación y Transporte que deben soportar el aumento de los anchos de banda.
- La posibilidad de un estancamiento de los accesos activos y que se centre la batalla por el cliente en una decisión de precios. Con lo cual necesitas dar más ancho de banda con mayor calidad y con las menores incidencias posibles.

Para comodidad del lector se pasarán a explicar en distintos subapartados.

2.4.1 El problema de las conexiones simétricas

La tecnología GPON como se ha comentado en apartados anteriores se basa en el despliegue de una red punto – multipunto desde un puerto PON hacia distintas ONTs situadas en cada una en las casas de los clientes y llegando a un límite de 64 (en algunos casos y fabricantes son 128 ONTs pero eso rebajaría los límites de la distancia de cobertura y además afectaría al ancho de banda a repartir entre los clientes) siendo dicho valor de 2.5 Gbps downstream y 1.25 Gbps upstream. El ancho de banda a repartir entre 128 clientes potencias es mucho menor que para 64 y eso sería sin duda un problema para las conexiones simétricas. Por tanto, se puede observar cómo la definición de la propia tecnología aboga por una asimetría en los anchos de banda empleados para cada ONT.

Sin embargo, el mercado ha ido imponiendo en las ofertas a los clientes el concepto de la simetría, impulsado principalmente por Jazztel antes de ser absorbida por Orange con sus publicitados 200 Mbps simétricos para Internet. Ello ha provocado que los operadores se encuentren con un problema de repartición de recursos del GPON pues si cada cliente tiene un ancho de banda máximo para Internet de 200 o de 300 Mbps para el upstream, ya se observa que el GPON no da para todos. Aunque es cierto que el tráfico sostenido de cada cliente en el upstream responde a conexiones de descargas P2P y es complicado que un cliente llegue a emplear durante un intervalo grande de tiempo ese máximo, los problemas de congestión ya están llegando en tramos nocturnos cuando los clientes empiezan todos a demandar más y más tráfico.

Una de las mejoras que aporta GPON respecto a las tecnologías xDSL por ejemplo, es que el flujo de tráfico de cada servicio va por canutos lógicos diferenciados como se explicó con el uso de los GEM Ports y eso hace que un cliente tenga un ancho de banda o máxima tasa binaria de por ejemplo, 300 Mbps para internet y que no se vea afectado por tener VoIP o IPTV también contratado. Los servicios son independientes entre sí y sólo es en el puerto PON donde se puede ejercer un cuello de botella y hacer que servicios *Best Effort* como Internet lleguen reducidos en su ancho de banda por congestión. Por tanto, ese cuello de botella afectaría a los clientes de Internet por igual ya que la simetría y esos valores que fuerza el mercado (300 Mbps), hacen que se entre en congestión más rápidamente ya sea en downstream como en upstream como se puede ver en la siguiente muestra donde se un caso de laboratorio con congestión de tráfico donde se inyectan 1.410 Mbps a 60 ONTs (23.5 Mbps a cada una) y observa pérdida, mientras que para el IPTV UP prácticamente llega todo el tráfico inyectado.

	Traffic Item	Tx Rate (Kbps)	Rx Rate (Kbps)
▶ 1	ONT 1-59 Internet UP	1,410,000.000	955,280.640
2	ONT 0-59 Internet DOWN	2,349,997.584	1,759,728.256
3	IPTV Up	43,055.040	42,920.640
4	IPTV Down	517,021.560	506,001.280

Tabla 8 Resultados Pruebas de Saturación sobre un puerto PON con 60 ONTs

Y no sólo por los posibles cuellos de botella, sino que también actúa el rendimiento del equipo tanto de ONT como de router que posea el cliente. Una correcta experiencia de usuario pasa también por potenciar las mejoras y los rendimientos de los chipsets de estos equipos y por mejorar las redes de los operadores en general pues factores limitantes como el retardo en tráficos como el TCP con algoritmo de ventana donde las confirmaciones de envío deben ser lo más rápidas afectan a los anchos de banda ofertados por los operadores para servicios como internet e incluso para otros más exigentes en tiempo real como la VoIP. La forma en que el retardo puede afectar se observa en la siguiente gráfica donde se inyecta un tráfico a una tasa binaria máxima de 300 Mbps aproximadamente y varía en función del retardo y del equipo donde aparece otro factor limitante como es el buffer para poder soportar envíos y recepciones de grandes tasas. Como se ha comentado antes, el retardo afecta a tráficos con confirmaciones de recepción pues cuanto más alto, más tiempo se tardará en enviar los mensajes de control de ventana del tráfico, y si a eso se suma un buffer pequeño las pérdidas serán tan altas que se observan unos valores mediocres de máximo ancho de banda recibido.

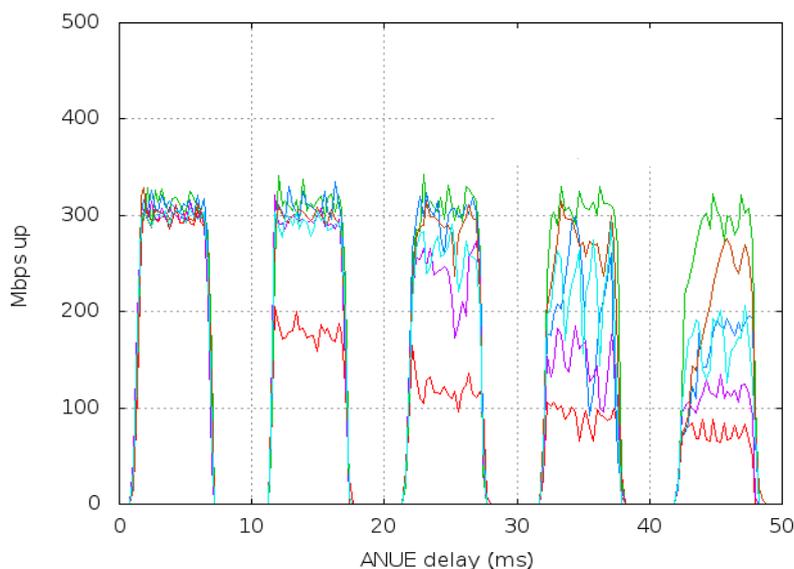


Figura 20 Evolución del BW recibido vs latencia con distintas ONTs del mercado español

Como podemos ver en la gráfica anterior, aumentando el retardo (eje X) introducido por un equipo de laboratorio como es el ANUE de Spirent [16] se empeora el rendimiento de los equipos (eje Y que muestra Mbps de upstream), pero ya de por sí hay equipos que por obsolescencia de sus componentes caen muy rápido en términos de ancho de banda en upstream (*por exigencias de confidencialidad no se ha podido identificar a qué ONT pertenece cada color*). Una entrada de nuevo equipamiento con tecnologías GPON que nazca trabajando a valores de prácticamente 1 Gbps simétrico como ocurriría con lo que se explicará a continuación daría pie a mejores tasas que las mostradas.

¿En realidad se necesita tanto ancho de banda para los clientes residenciales? Quizás no, pero es lo que el mercado está imponiendo. En un reciente estudio de la web ADSLZONE [17] especializada en temas tecnológicos como las redes de acceso y su impacto entre los clientes, entre otras cosas, establece el siguiente criterio de uso de los distintos anchos de banda según aplicaciones o contenidos accesibles por el servicio de Internet:

- Youtube: Mínimo 500 kbps para una correcta visualización de contenidos. Valores normales para experiencia global de contenidos de 1 Mbps.
- Netflix: desde los 3 Mbps de streaming con calidad normal, no HD, hasta los 25 Mbps para contenidos con calidad 4K o Ultra Alta Definición.
- VoIP con Skype: desde los 100 Kbps hasta los 7 Mbps para conversaciones grupales
- Spotify o Itunes: De 1 a 2 Mbps dependiendo del contenido. Estas aplicaciones sirven música y vídeo.
- Videojuegos online: Valor recomendado de 2 Mbps donde lo más importante es el parámetro de calidad dado por el retardo o latencia que se podría conseguir priorizando este servicio por encima de otros en casos de congestión.

Por tanto, se podría concluir que contando con que habría más de un dispositivo en la casa de un cliente estándar que sería una familia compuesta por 4 miembros, **el mínimo de BW para Internet podría estar cerca de los 10 Mbps**. Esto indica que las exigencias del mercado han disparado los anchos de banda y ello ha provocado una descompensación de los recursos comparados con lo que se podría dar, pero las redes deben estar preparadas para el futuro aumento de esos anchos de banda. Es más, en un reciente estudio interno de Telefónica se ha establecido que en dos años la tasa media que un cliente consume al día en media se ha triplicado, llegando desde los 300 Kbps hasta el 1 Mbps.

Llegados a este punto, cabe destacar que sólo se ha hablado del cliente residencial. En el caso de los clientes de empresa donde la demanda de ancho de banda es mayor y dada su importancia, incluso su tratamiento ante casos de congestión debería ser más prioritario que el propio cliente de residencial, el factor asimétrico del GPON se ve aún más comprometido. Actualmente, las tasas ofertadas para las empresas serán de unos 300 Mbps simétricos para competir con este cliente tan importante, también con una calidad (QoS) a nivel Ethernet mayor, por tanto, eso generará mayor repartición de recursos a estos clientes, antes que a los residenciales.

Además, independientemente del tipo de cliente aparecerían otros servicios que pueden tener un gran aumento en el futuro como el e-Health, Educación Online, Monitorización del Hogar, Servicios de Vídeo-conferencia, aplicaciones sobre Cloud como vídeos, contenidos didácticos, bases de datos, etc. Todo ello hará de la asimetría un problema y las futuras evoluciones de los Sistemas PON, la solución.

2.4.2 El problema de la repartición de recursos

Una de las posibles configuraciones que sostiene el estándar G.984.3 en cuanto a la gestión de los distintos anchos de banda posibles a configurar como ya se vio en el apartado 2.2 es el de la distribución de los recursos para el upstream. Más allá de los valores de máximos anchos de banda posibles a configurar, existe el concepto de asegurado que se rescata en este subapartado. Y es que la gestión de los asegurados es un límite de dimensionado importante para la provisión de los clientes en el GPON y para la distribución del ancho de banda.

A día de hoy se configura, como ya se explicó, el TCONT type 3, que permite una redistribución dinámica de slots o de Bytes para que cada ONT transmita más datos con una frecuencia de mayor y por extensión, que tenga la posibilidad de transmitir a una velocidad binaria más cercana del máximo configurado. Sin embargo, el asegurado es un recurso limitado gestionable por la OLT en cada puerto PON hasta el máximo nominal de 1.25 Gbps a lo que habría que descartar el ancho de banda para la gestión de cada ONT (asegurado para protocolo OMCI de cada conexión), cabeceras y bandas de guarda para que se solapen los envíos de cada ONT. **En total se tendría un ancho de banda máximo para la repartición de asegurados de valor cercano al 1 Gbps.**

En la configuración de cada servicio de cada ONT en todos los operadores de España se deja un valor de asegurado para casos de congestión, de esta forma, si la suma de los asegurados supera el 1 Gbps aproximadamente, la OLT no permite la configuración de más clientes. Por tanto, se puede observar cómo la repartición de los

asegurados para el upstream impulsa un nuevo problema que futuras evoluciones de la tecnología del GPON permiten solventar aumentando el ancho de banda disponible para el upstream en cada puerto PON.

2.4.3 El problema del dimensionado de tráfico la OLT

Actualmente las OLTs han ido evolucionando gracias a la mejora y al aumento de la capacidad de sus buses de datos, del número de puertos PON por tarjeta, del número de puertos posibles a conectar hacia la Red de Agregación, en el número de filtros, de entradas ARP, etc. Los modelos de OLT que se pueden consultar en los fabricantes de equipamiento GPON más importantes o más desplegados en España tienen las siguientes características que se han podido encontrar de forma gratuita y libre en internet:



Figura 21 Chasis OLT de Huawei Modelo MA5600T

- Chasis de Huawei [18] de capacidad de 960 Gbps para albergar 16 tarjetas de línea.
- Cada tarjeta de línea llevaría 8 puertos PON para dar conectividad a 64 o 128 ONTs como máximo por cada puerto PON.
- Posibilidad de utilizar varias tarjetas de conexión con la Red de Agregación, llevando hasta 4 puertos de 10 Gbps cada una.



Figura 22 Chasis OLT de Alcatel-Lucent (Nokia) Modelo ISAM 7302

- Chasis de Alcatel-Lucent [19] para conectar 16 tarjetas de línea con 8 puertos PON cada una con una capacidad de trabajo en sus buses de datos de 320 Gbps.
- Capacidad de redundancia de tarjeta de conexión hacia Red de Agregación o controladora con hasta 4 puertos de 10 Gbps cada uno.

Por tanto, como se puede observar **las propias tarjetas de las OLTs de GPON ya advierten una posible limitación o “cuello de botella” en cuanto a la gestión de tanto posible ancho de banda para todos los usuarios** y también para poder enviar y recibir de la Red de Agregación. Obviamente cada vez que se sube en la jerarquía de las redes los equipos deben ser más potentes y capaces, pero en el caso del GPON, una evolución de nuevas tarjetas podría traer consigo la evolución de los buses de datos (equipamiento de OLT en general) con más capacidad para poder dotar de toda la velocidad binaria que demandan las nuevas tecnologías que evolucionan el GPON hacia tasas de 10 Gbps simétricos por cada puerto PON o longitud de onda en otros casos como se verá en posteriores capítulos.

2.4.4 El problema de la capacidad de routing de una OLT

La OLT como recoge el estándar G.984 y G.988 es un equipo que gestiona tráfico desde la Red de Agregación hacia la Red del Cliente pasando por la encapsulación en el protocolo GEM. Sin embargo, no se recogen directivas sobre la cantidad de recursos que el cerebro del equipo OLT debe derivar para la gestión del routing. Protocolos como el ARP, funciones de encaminamiento gracias al protocolo RIP o al OSPF, filtros IP para evitar accesos fraudulentos o filtros de RIP para evitar la

propagación de redes innecesarias son algunos de los procesos que debe llevar toda OLT en España. Más allá de la capacidad de trabajar con VLANes, la OLT debe gestionar mucha información y recursos para el routing y en este punto, muchas veces bajo requisito expreso del operador, la OLT puede tener un elemento limitante para su funcionamiento.

La posible proliferación de más servicios que exijan conexiones con más capacidad y con retardos mínimos o el aumento de los clientes por cada puerto PON puede determinar un cuello de botella en la configuración y en el despliegue del GPON, siendo éste otro motivo para tener en cuenta una evolución que permita reconocer a usuarios por una diferenciación física como las longitudes o incluso un aumento de la capacidad que puede llevar consigo un aumento de recursos para el routing. Desde el presente Trabajo se aboga sin duda en una mejora de las configuraciones para hacer en la medida de lo posible que los servicios, en el actual GPON, sean configurados para trabajar a nivel Ethernet y sea el elemento diferenciador para la gestión del tráfico, más allá del routing. Tal y como describe la recomendación del *BroadBand Forum TR-101* [20] donde se explica la posibilidad de trabajar solo con VLAN en el nodo de acceso, como es la OLT y donde no se va a entrar en detalle pero que puede servir para establecer una futura de línea de trabajo donde se conviertan todos los servicios a nivel Ethernet en una OLT.

2.4.5 La diferenciación de los clientes

La diferenciación de los clientes es uno de los aspectos más importantes para tomar la decisión de introducir las siguientes evoluciones del GPON: la diferenciación de los clientes. Actualmente junto con el aumento del ancho de banda y de los distintos dispositivos que se conectan a internet o del acceso cada vez mayor de las empresas a las Tecnologías de la Información para su funcionamiento y progresión, la Red de Acceso ha visto cómo los clientes cada vez más demandan diversos y diferentes recursos como:

- **Ancho de banda asegurados y máximos** → asegurar una capacidad para vídeo-llamada, mínimo de calidad para vídeos en Youtube, Netflix, etc.
- **Retardos** (congestión, acceso al medio, etc) → que permiten por ejemplo a gamers o bloggers tener una mejor experiencia de usuario
- **Infraestructura de equipamiento y su calidad** (tiempo entre fallos) → cada vez en las empresas se demanda una gestión y una respuesta para una instalación que gestione todo su volumen de datos y de equipos conectados.
- **Calidad en los servicios de IPTV** → nuevos canales 4K que se tengan que enviar a tasas de más de 20 Mbps exige un aumento de los recursos dados para el downstream en el GPON.

- **Mayor calidad de ciertos servicios** → En casos de congestión, una conexión de VoIP debe ir perfecta y que se tire tráfico Best Effort.
- **Aparición de nuevos servicios y exigencias de los nuevos clientes como las empresas** → la creciente demanda de servicios de Cloud o el Internet de las Cosas hacen que cada vez se demanden más conexiones y sobre todo simétricas, por lo que diferenciar clientes y dotar de simetría en su acceso por fibra serán indispensables. Las empresas o residenciales especializados en trabajos de contenidos sobre Internet hacen un uso más intensivo del upstream.
- **Exigencia de procesamiento debido a nuevos servicios y nuevas tecnologías** → Tecnologías como el 5G para redes móviles donde la necesidad de acercar los puntos de conexión o las antenas se hace patente, puede que necesiten emplear la red de fibra desplegada ya para accesos FTTH. De esta forma surge la necesidad de que los sistemas PON deban operar con protocolos que antes no aparecían como obligatorios, tales como CPRI o 1588v2, para poder trabajar con sincronizaciones y velocidades exigentes tal y como podrán necesitar los elementos que operen en 5G. Las OLTs y las ONTs podrían ser meros elementos de transporte que deben aportar el mínimo retardo posible, de ahí que los sistemas PON actuales y futuros deban operar con los protocolos antes mencionados y además emplear técnicas de *wire-speed* para procesar más rápido los paquetes como anunció Nokia en su Roadshow que tuvo lugar el pasado abril de 2016 en Distrito Telefónica en Madrid.

Todos estos motivos hacen que se necesite mayor ancho de banda y mejores capacidades en cuanto a tráfico se refiere o directamente otra forma de gestionar y de configurar los usuarios. Y es en este punto donde entra en juego la principal motivación para poder introducir evoluciones tecnológicas sobre la red FTTH como el XGS-PON, que permite unas tasas binarias de 10 Gbps simétricos sobre la misma tirada de fibra que actualmente está desplegada con una longitud de onda de downstream y otra para upstream; o como el NG-PON2 que permite hasta 8 longitudes de onda de downstream y 8 de upstream donde se pueden trabajar con hasta 10 Gbps por cada una de ellas y donde se permite la configuración distinta a nivel físico (longitud de onda) para grupos de clientes. Por tanto, a continuación, se pasará a explicar más en detalle cada estándar o evolución con la que se dará respuesta a los problemas mencionados en este apartado del presente TFM.

Capítulo 3. Un paso intermedio: XGS-PON

3.1 Introducción. ¿Por qué surge XGS-PON?

A lo largo de 2015 se fueron terminando y resolviendo los últimos flecos para la publicación de los estándares para el correcto funcionamiento y despliegue técnico de la tecnología de NG-PON2 en la serie G.989 [21] que suponía un gran avance en electrónica, anchos de banda, capa física y capacidad de los equipos. Unos años antes, entre el 2009 y 2010, los fabricantes tuvieron que tomar la decisión de apostar o no por un despliegue comercial de una evolución intermedia entre el GPON y el NG-PON2 llamada XG-PON1 cuyo estándar es la serie G.987 y que supone una mejora respecto al GPON en cuanto al ancho de banda gracias a una transformación de la trama GTC en algo más complejo llamada trama XGTC y sobre un protocolo denominado XGEM. Esa complejidad se tradujo en la tecnología XG-PON1 que empleaba unos láseres distintos que GPON, a otras longitudes de onda (rango de uso de 1260 a 1280 nm para el upstream y rango de 1575 a 1580 nm para el downstream, aunque siempre se emplee una sola longitud de onda de trabajo de ese rango permitido y que otras tecnologías no podrían usar) y sobre todo a otros anchos de banda: 10 Gbps en downstream y 2.5 Gbps en upstream.

Sin embargo, mantenía el problema o la limitación de ser una tecnología asimétrica como su predecesor y pensar en una simetría de ancho de banda a 10 Gbps en una sola lambda de acuerdo a las exigencias del mercado y de los clientes explicadas en el capítulo anterior, imponían otro estándar que no llegó a nacer llamado XG-PON2 (y que junto con XG-PON1 formarían la familia NG-PON1 [22] dada la complejidad y coste que suponía en ese momento. Esa asimetría se aplicaba también a los anchos de banda asegurados que se mencionaban como un problema dentro del despliegue actual del GPON. Aumentando el ancho de banda de downstream y manteniendo la asimetría dando solamente 2.5 Gbps de upstream forzaba a una política de asegurados en este sentido del tráfico más restrictiva a pesar del aumento. Por tanto, el XG-PON1 en este aspecto también se podría quedar limitado a corto plazo.

Además, los costes de los láseres que ya debían ser modulares de tipo XFP para poder reemplazar o cambiar sin problemas (en los primeros años de despliegue del GPON, las OLTs traían los láseres soldados a la tarjeta), el diseño de las ONTs y su coste, junto con el esfuerzo económico que ya estaban haciendo los operadores para montar cientos de OLTs con unas tarjetas más asequibles como eran las de GPON, hacían del XG-PON1 quizás una tecnología interesante, pero “fallida” desde su nacimiento. En este punto, los fabricantes, organismos internacionales y presión de los operadores, hicieron posible que en poco tiempo las miradas se enfocaran en la

descripción de la tecnología NG-PON2, la cual se explicará detalladamente en el capítulo 4 del presente Trabajo. Aunque si bien es cierto en España se ha “coqueteado” con esta tecnología de XG-PON1 como así anunció Telefónica en un artículo publicado en septiembre de 2014 [23] y de donde se extrae el siguiente test de velocidad para un cliente piloto con conexión de 1 Gbps simétrico entre OLT y ONT.



Figura 23 Test de velocidad en línea 1 Gbps simétrica sobre XG-PON1 (NG-PON1)

Pero surgió un problema. El salto evolutivo del GPON al NG-PON2 sí era coherente por las necesidades impuestas en el mercado dados los servicios y anchos de banda que se comentaron en el capítulo 2, pero la tecnología aún no está madura en términos de disponibilidad y de costes. Sin entrar en este punto más en detalle pues se tratará en el siguiente capítulo, cabe destacar que los costes de usar láseres “colorless” (concepto en inglés americano para indicar que un equipo no está sujeto a una sola longitud de onda, es decir, que sean equipos sintonizables), los requisitos de instalación en central y la escasa disponibilidad de los equipos de NG-PON2 hicieron que los fabricantes tomaran la decisión de apostar por una tecnología puente, con anchos de banda simétricos que se valiera de elementos tecnológicos ya descritos y desarrollados como los láseres XFP para las longitudes de onda existentes y fijas (reduce costes respecto al NG-PON2), y con una estructura de trama también desarrollada para disminuir los tiempos para la descripción técnica. Además, fabricantes de equipamiento de redes PON apostaron por emplear una evolución de 10 Gbps simétricos siguiendo el estándar ya planteado del IEEE 802.3bk [24] y la ITU-T y los suministradores que vieron con buenos ojos este movimiento, tuvieron que plantear una evolución intermedia de sus redes.

Todo ello finalmente ha dado lugar a un nuevo estándar y tecnología que se denomina XGS-PON que tal y como enuncia *David Russell* [25], Director de Soluciones y Marketing de la empresa americana Calix viene a responder de forma inmediata, como

se ha comentado a lo largo de este apartado, a la necesidad de disponer de grandes anchos de banda para distintos servicios y distintos clientes haciendo de tecnología puente hasta la llegada del NG-PON2 (que supondrá una gran mejora en muchos aspectos como se verá en el presente trabajo) debido al coste que por ahora supone el despliegue y la óptica sintonizable de esta última tecnología.

3.2 ¿Qué es el XGS-PON?

El XGS-PON es un sistema PON de nueva generación que opera a una velocidad de línea nominal de 10 Gbps en cada longitud de onda de trabajo. Al igual que ocurría con el GPON, se trabaja sobre una longitud de onda para downstream, otra para upstream que serán comunes para todos los clientes de esta tecnología, pero distinta del GPON por ejemplo; si bien es cierto que se plantea la posibilidad de usar una segunda longitud de onda para el downstream de vídeo de acuerdo al estándar de la ITU-T J.185 [26] y J.186 [27]. Gracias al reciente estándar o especificación publicada de forma oficial en la ITU, bajo el código G.9807.1 en febrero de 2016 *Recommendation ITU-T G.9807.1: 10-Gigabit-capable symmetric passive optical network (XGS-PON)* [28], se obtiene una visión más técnica de esta tecnología.

La característica principal antes de pasar a explicar técnicamente cómo se plantea esta solución para trabajar con 10 Gbps simétricos, recae en el apartado 6 del G.9807.1 citado donde se cita directamente al estándar del IEEE. En este punto se considera recomendable usar si fueran posibles las especificaciones de la capa PMD (capa física) y la óptica modular como el PR30 del 802.3bk así como el uso de una modulación óptica en amplitud (OMA) [24] que permite dicho estándar. El PR30 es una recomendación dentro del estándar 802.3bk que estipula el balance óptico y las pérdidas soportadas para una transmisión de 10 Gbps simétricos a las longitudes de onda de 1577 nm para downstream y 1270 nm para upstream que son muy parecidas a las planteadas por el estándar de la ITU-T para el XGS-PON (se toman normalmente los valores centrales de los rangos propuestos por los organismos de estandarización). La posibilidad de emplear esta óptica hace posible que los operadores y los suministradores no tengan que emplear otra óptica (otro XFP) distinto para trabajar con 10 Gbps y de esta forma se permite una cierta economía de escala que ayude a compensar los costes de un desarrollo ya establecido si se han seguido las directrices del IEEE. Además, esto ayudaría a competir en costes con muchos más suministradores, algo que beneficiaría al operador en su despliegue.

Esta nueva especificación plantea diversos aspectos que han sido impulsados por los operadores sobre todo que no quieren tener chasis de OLTs distintos para GPON, XG-PON1, NG-PON2 y XGS-PON, además de la configuración. De esta forma se plantean los siguientes aspectos destacables sobre el G.9807.1 antes de pasar a explicar un poco más en detalle la forma de trabajar de esta tecnología.

- En la cláusula A.5.1 aparecen los rangos de longitudes de onda reservados para trabajar con XGS-PON, que serán los mismos que para XG-PON1 si no se emplea alguna de las variantes que se muestran a continuación para que puedan convivir. En la actualidad, los suministradores de XGS-PON apuestan por reutilizar el rango de XG-PON1. En la siguiente tabla aparece la referencia de XG-PON1 porque así aparece en el estándar, pero en realidad debería ser XGS-PON para no confundir al lector.

Items	Notation	Unit	Nominal value	Application examples
XG-PON1 Upstream				
Lower limit	-	nm	1260	For use in XG-PON1 upstream.
Upper limit	-	nm	1280	
XG-PON1 downstream (Basic band)				
Lower limit	-	nm	1575	For use in XG-PON1 downstream (Note 2)
Upper limit	-	nm	1580	

Tabla 9 Rangos de longitudes de onda de trabajo para XG-PON1. Tabla A.5-1 del G.9807.1

- En la cláusula A.6.1 se describe el posible escenario de una migración total tras una previa coexistencia entre la tecnología GPON, vídeo overlay y XGS-PON donde las longitudes de onda para XGS-PON se diferencian claramente del GPON y del vídeo overlay como se ha indicado en el apartado anterior.

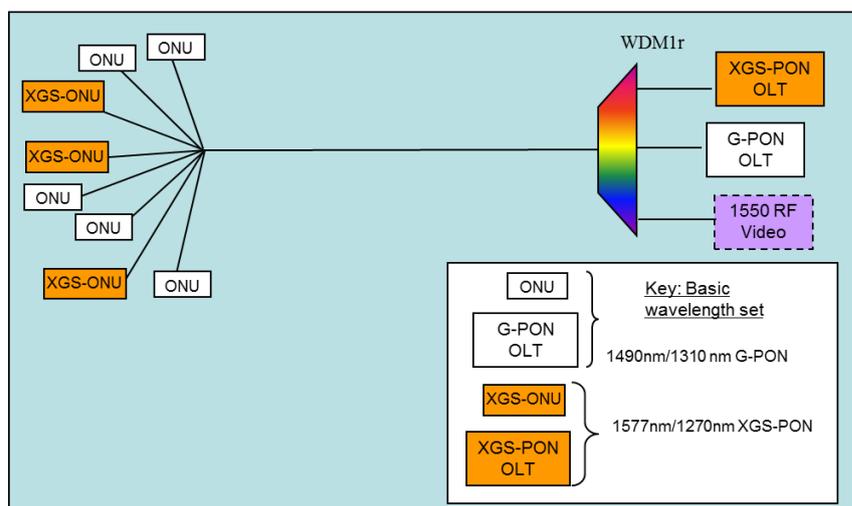


Figura 24 Escenario 1 de coexistencia. Figura A.6-1 del G.9807.1

De esta forma, desde distintas OLTs, una para cada tecnología, y conectadas a un multiplexor WDM1r como se denomina en la figura, podrían coexistir en la misma ODN varios tipos de ONUs (de distinta tecnología). Este elemento

WDM1r es el CEx o Elemento de Coexistencia que también aparece en NG-PON2 que se explica en el siguiente capítulo.

- En la cláusula A.6.2 se describe el posible escenario de una migración total tras una previa coexistencia entre la tecnología XG-PON1, vídeo overlay y XGS-PON donde las longitudes de onda para XGS-PON se diferencian claramente del XG-PON1 y del vídeo overlay pero usando las longitudes de onda del GPON para el XGS-PON como se ve en la siguiente figura.

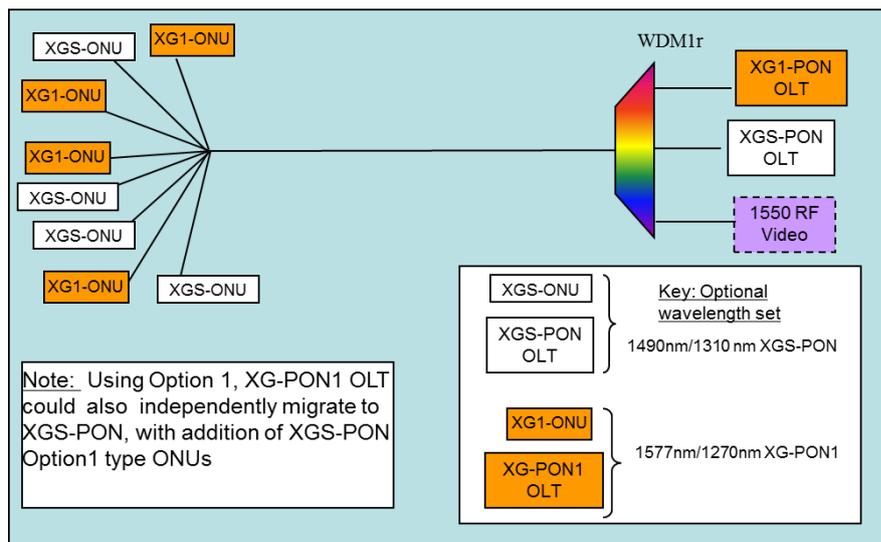


Figura 25 Escenario 2 de coexistencia. Figura A.6-2 del G.9807.1

Esta solución no sería la correcta para el mercado español pues no existe un despliegue masivo ni comercial de la tecnología XG-PON1 y sí del GPON, por tanto no sería el caso que atañe al presente Trabajo.

- En la cláusula A.6.3 se describe el posible escenario de una migración total tras una previa coexistencia entre la tecnología XG-PON1, vídeo overlay y XGS-PON donde las longitudes de onda para XGS-PON y del XG-PON1 serían las mismas y sólo un mecanismo de acceso al medio por tiempo (TDMA) haría posible la coexistencia como se ve en la siguiente figura.

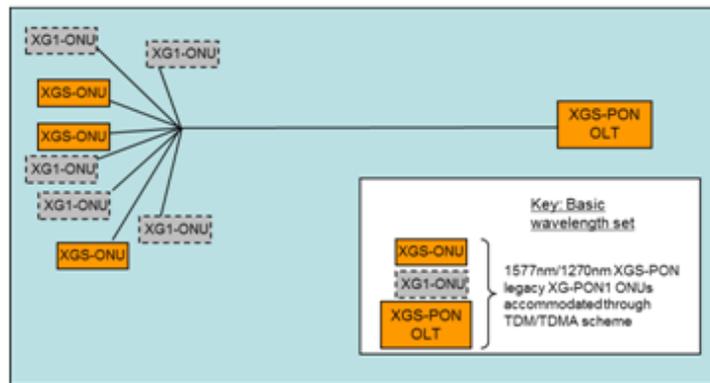


Figura 26 Escenario 3 de coexistencia. Figura A.6-3 del G.9807.1

Este extremo se rechaza recomendado desde este trabajo por la complejidad que ello supone y la fuente de problemas que puede dar lugar debido a dificultades de deriva temporal en el envío de la trama o ineficiencias en el turno de envío de cada ONU de cada tecnología a las velocidades que se están barajando de 2.5 Gbps y de 10 Gbps para XG-PON1 y XGS-PON para el upstream respectivamente.

Finalmente sea cual sea el escenario elegido, siendo recomendable de forma imperativa el primero de los mencionados, el escenario de coexistencia a nivel de equipamiento aparece plasmado en la cláusula A.5.5

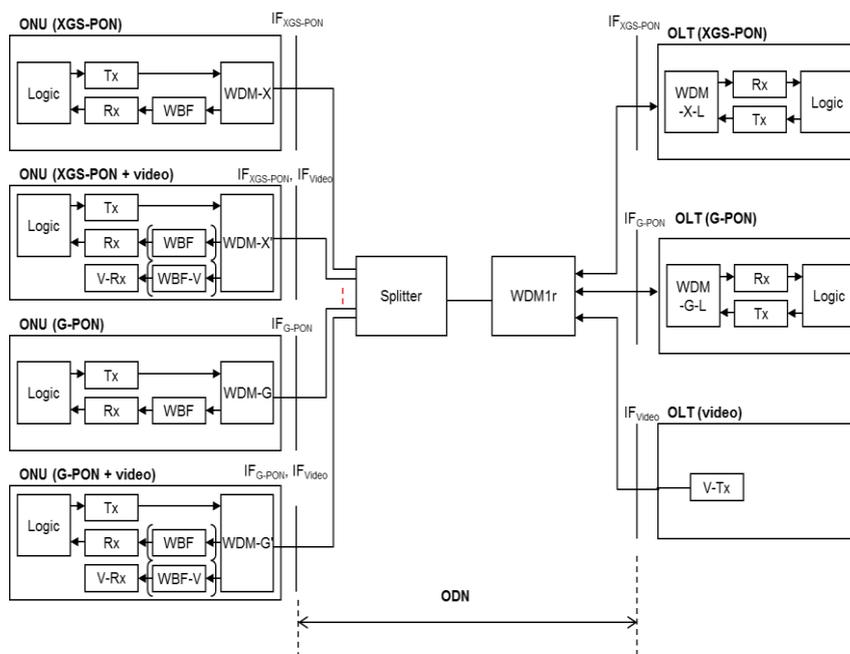


Figura 27 Escenario general de coexistencia. Figura A.5-5 del G.9807.1

- Durante el documento se hace continua mención a aspectos de configuración que debe recoger el futuro estándar para compatibilizar una posible coexistencia con el NG-PON2, que será la siguiente evolución tecnológica, ya estandarizada. Aunque en el presente trabajo no se ha llegado al punto de su explicación, conceptos como el CT (*Channel Termination*) y su entidad para configurar aparecen en los apéndices como una mejora a publicar. Y es que de cara la gestión y configuración en los sistemas de los operadores es muy importante que se hereden conceptos, comandos y configuraciones para dar de alta servicios, clientes, etc, de esta forma si la provisión en un sistema XGS-PON ya emplea conceptos como el descrito, el concepto es mucho más claro para el operador. Recuérdese que el estándar de NG-PON2, aunque suponga un paso más evolucionado que el XGS-PON existe anteriormente a éste y por tanto ya era conocido por los operadores.

Por tanto, llegados a este punto donde se sitúa la intención de los operadores por una coexistencia que asegure un impacto económico y una complejidad en sus redes menor y que aparece recogido en el G.9807.1, se pasa explicar los conceptos técnicos más importantes de lo que hasta ahora se ha descrito en dicho documento y que puede valer a los operadores y fabricantes para establecer unas líneas de cómo debe funcionar esta tecnología para dar soporte a la necesidad más importante que plantea el XGS-PON, la simetría de los anchos de banda sobre una ODN con más de una tecnología viva.

El esquema que plantea el G.9807.1 para la arquitectura de un sistema PON con XGS-PON no es más que el planteado para las tecnologías anteriores que se recogen en los estándares G.987 [22] y G.984 [1].

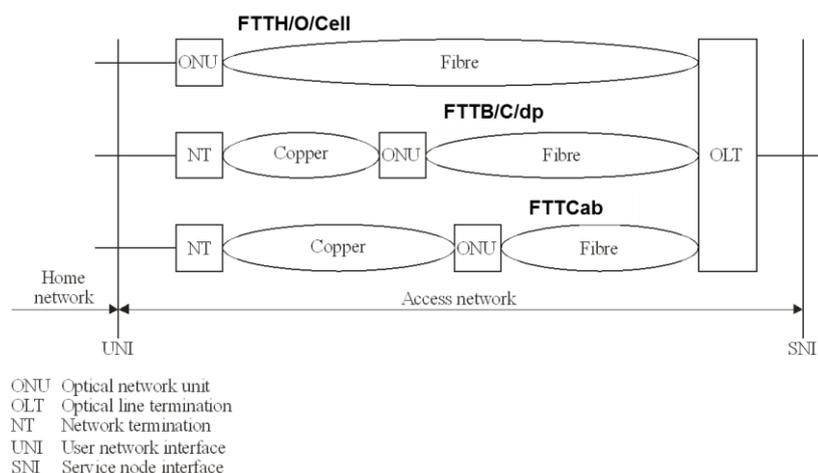


Figura 28 Arquitectura de red para XGS-PON en el apartado A.5-1 del G.9807.1

Donde se permite a elección del operador dónde termina la fibra o se instala la ONU. En España se ha generalizado el acceso por FTTH, pero en instalaciones donde instalar la fibra en el tramo del hogar sea complicado, es factible el uso del FTTB o FTTdp que plantea una instalación de la ONU en el edificio o en la misma puerta de la casa del usuario. Este sería el caso residencial, pues en el de empresa se podría usar perfectamente siempre el FTTB con una ONU modular también llamada MDU que permite distintos interfaces de cobre para cubrir, por ejemplo, distintos puestos de trabajo.

Cabe destacar el FTTCell que implica el uso y conexión de un equipo de acceso móvil haciendo que se emplea el sistema PON como una mera red de transporte entre la RNC y el nodo B si es para una conexión de una red UMTS móvil, como se plantea en la siguiente figura (CBU significa *Cell-Site Backhauling Unit*):

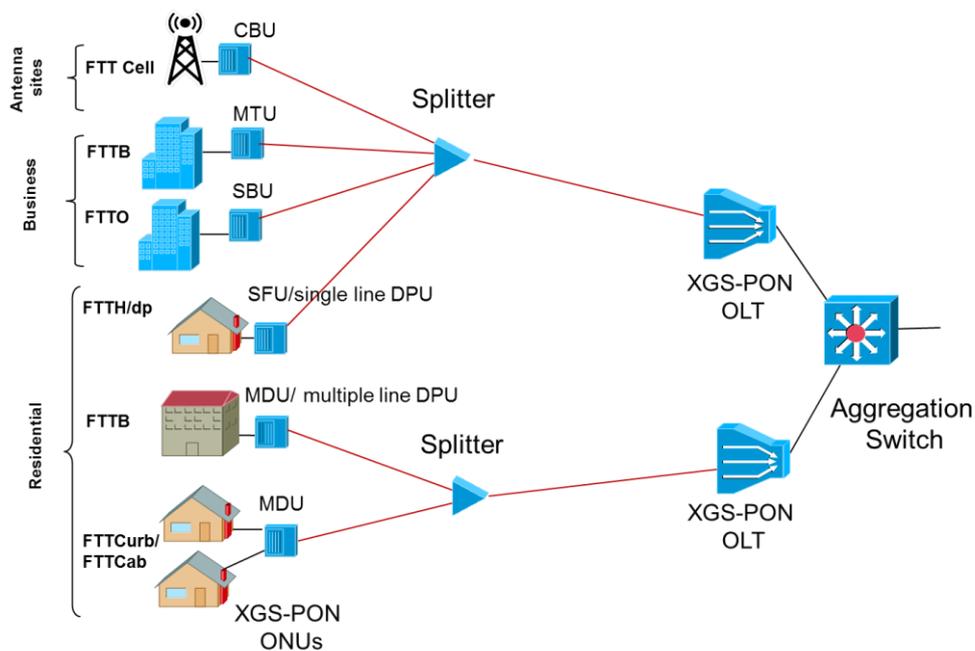


Figura 29 Distintas arquitecturas de red para XGS-PON en el apartado A.5-2 del G.9807.1

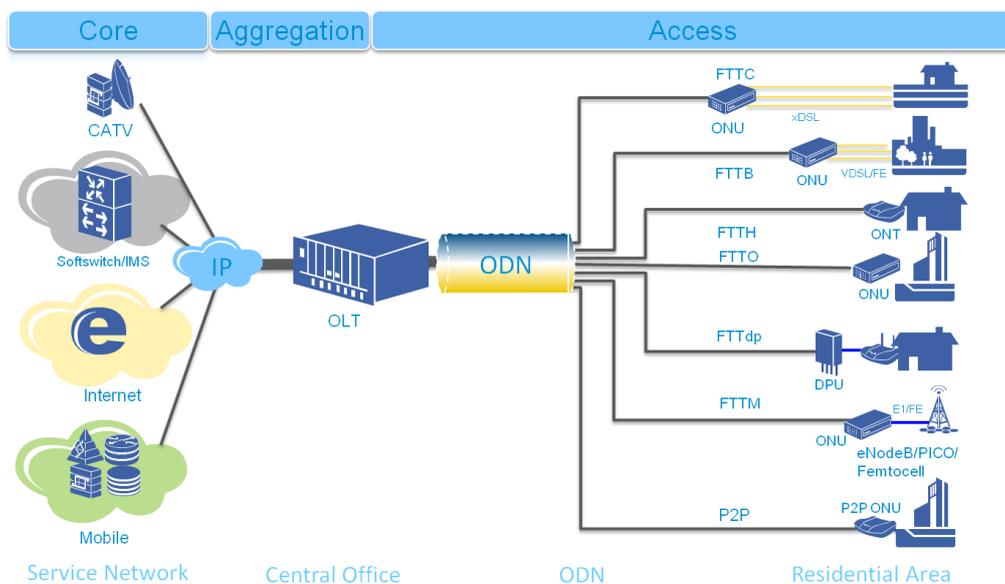


Figura 30 Arquitecturas FTTx posibles para un despliegue con sistemas PON

En todo caso se impone la siguiente restricción en cuanto a distancias que se describe en la figura A.5-1.

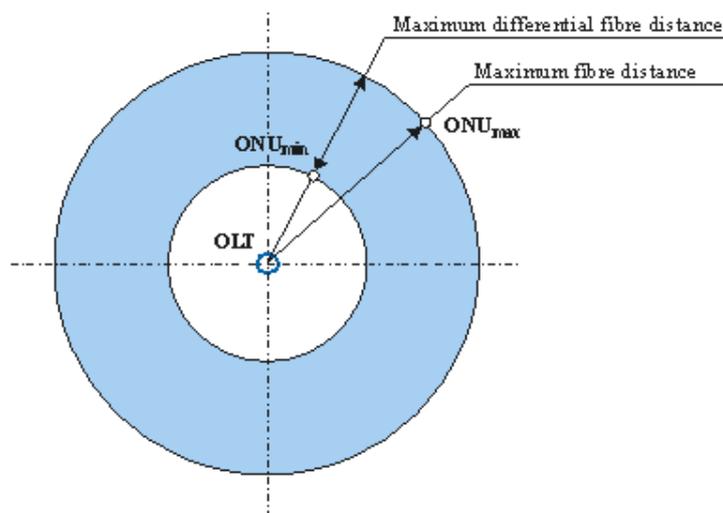


Figura 31 Gráfico de las distancias máximas entre ONU y OLT del apartado A.5-1 del G.9807.1

Donde la distancia máxima entre la OLT y una ONU puede ser 20 km o 40 km. Y la distancia máxima diferencial entre ONUs será de 20 km debido a la sincronización, ya que, a más de 20 km de diferencia, el diferente delay de las ONUs haría imposible la correcta sincronización de todas. Las OLTs permiten por configuración sincronizar ONUs a distancias entre 20 y 40 km, pero para ello habría que reducir el nivel de splitting pues la atenuación sería un elemento insalvable para la sincronización. En

España se trabaja de forma general con una distancia máxima de 20 km y con la forma de trabajar descrita en el capítulo 2 del presente trabajo.

En cualquier caso, para poder operar con estas arquitecturas a las velocidades ya expuestas durante el presente trabajo, el sistema XGS-PON debe cumplir con una serie de requisitos que se describen a continuación:

- La OLT y las ONUs deben configurar y entender las siguientes capas o protocolos donde se asienta el correcto funcionamiento del protocolo XGEM, que a diferencia del GEM usado en el GPON, éste sí es compatible con las velocidades de línea y las tramas usadas en las nuevas tecnologías:
 - o Capa XGS-PON TC (*XGS-PON Transmission Convergence*): es una capa de protocolo entre la capa física y los clientes de un PON que se compone de varias subcapas para la adaptación del servicio, otra para el entramado y otra para la adaptación con la capa física.
 - o La subcapa de entramado o *XGS TC framing layer* permite la encapsulación y el alineamiento de las tramas o ráfagas de tramas, además de procesar mensajes como los Alloc-ID para la gestión del envío en el upstream
 - o La capa de adaptación al medio físico o *XGS TC PHY adaptation* soporta las funciones de sincronización y alineamiento con la capa física, así como las técnicas de corrección de errores y de encriptación.
 - o La capa de adaptación al servicio o *XGS TC service adaptation* se emplea para soportar las funciones de fragmentación y reensamblado de las tramas de datos de los usuarios y de las tramas de OMCI, de la encapsulación de las tramas XGEM y del filtrado de los identificadores de XGEM Port, algo básico para que las ONT u ONUs sepan qué tráfico va dirigido a ellas.

De esta forma se tiene el siguiente esquema de capas para el correcto funcionamiento del XGS-PON

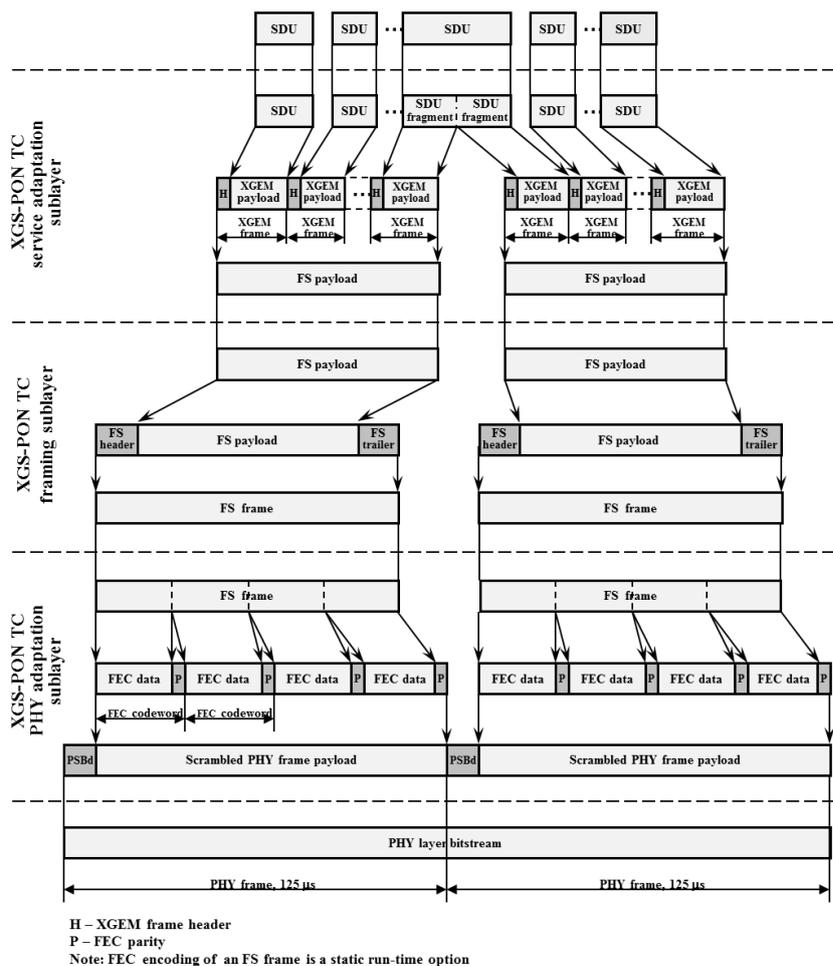


Figura 32 Mapeado de las tramas en downstream en distintas capas del apartado C.6-1 del G.9807.1

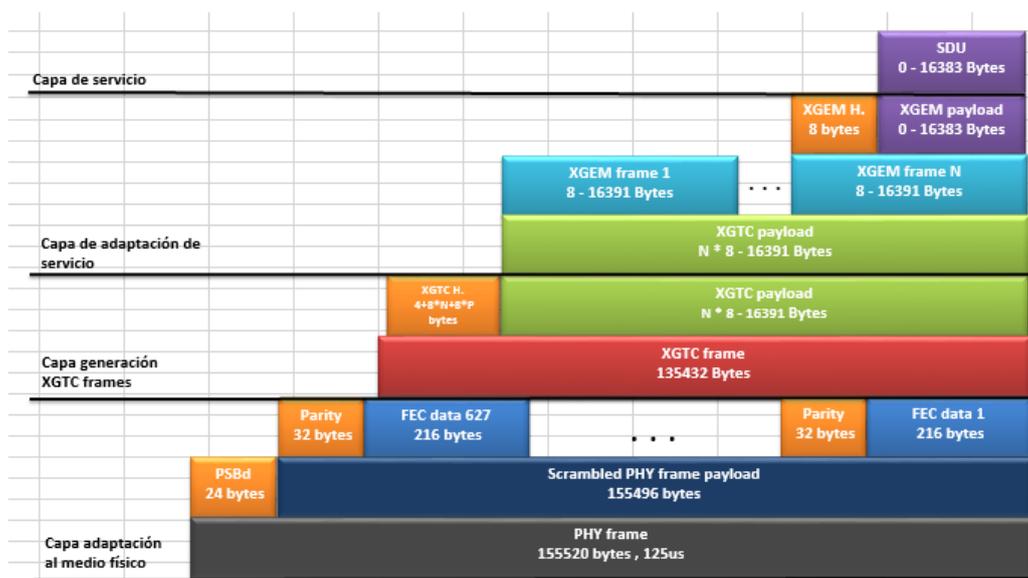


Figura 33 Mapeado de las tramas en downstream en distintas capas del apartado. Resumen

- Se plantea la posibilidad de trabajar principalmente con servicios de nivel 2 o Ethernet. Para ello se debe resolver la configuración del servicio a nivel OMCI, a nivel de gestión mediante entidades que ordenan a la ONU cómo debe trabajar (son entidades enviadas desde la OLT hacia las ONUs), gracias al estándar G.988 de la ITU-T [2]. Debe ser compatible con el TR-156 [29] para el tagging y conmutación de etiquetas de vlan 802.1q y se debe resolver la forma de llevar este nivel a una abstracción que lo absorba para enviar sobre el protocolo XGEM de forma que se contemple el siguiente esquema o pila de protocolos.

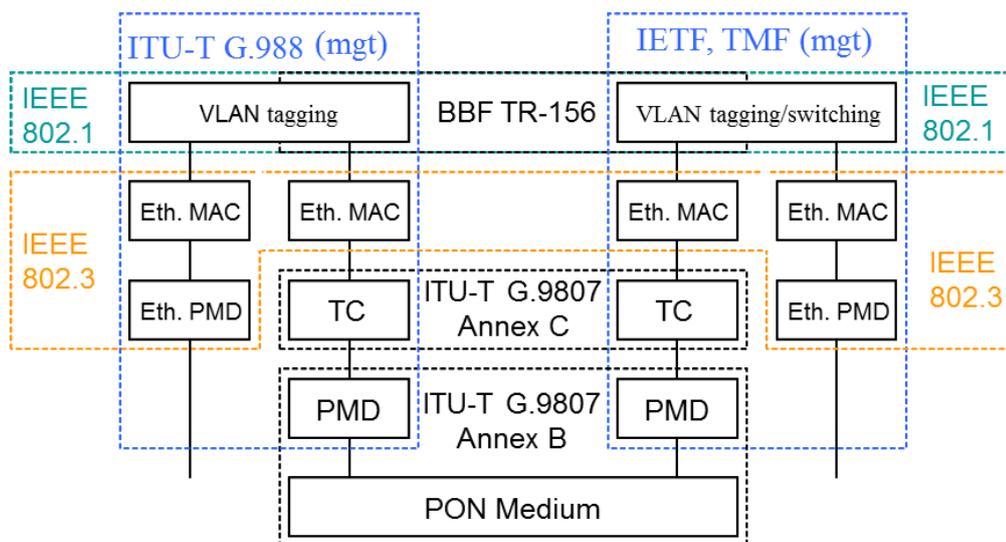


Figura 34 Pila de protocolos para XGS-PON del apartado A.I.12 del G.9807.1

- Las codificaciones de línea para ambos sentidos del tráfico será de tipo NRZ según las cláusulas B.9.2.4.1 y B.9.2.4.2
- Los balances ópticos y la máxima atenuación soportada serán las siguientes, siendo recomendable la N1 pues desde la N2 en adelante están en estudio. En la siguiente tabla se recoge la diferencia respecto a los balances disponibles para la tecnología GPON (B+ y C+) y los de XGS-PON (N1, N2, E1 y E2).

	'GPON B+' class	'GPON C+' Class	'Nominal 1' class (N1 class)	'Nominal 2' class (N2 class)	'Extended 1' class (E1 class)	'Extended 2' class (E2 class)
Min Loss	13 dB	17 dB	14 dB	16 dB	18 dB	20 dB
Max loss	28 dB	32 dB	29 dB	31 dB	33 dB	35 dB

Tabla 10 Balances ópticos para enlace XGS-PON apartado B.6-1 del G.9807.1

De esta forma se obtiene que un despliegue en planta real y comercial para que puedan convivir las dos tecnologías, el balance de pérdidas contando dos divisiones de splitting para un total de 1:64 y con las pérdidas introducidas por el CEx debe ser:

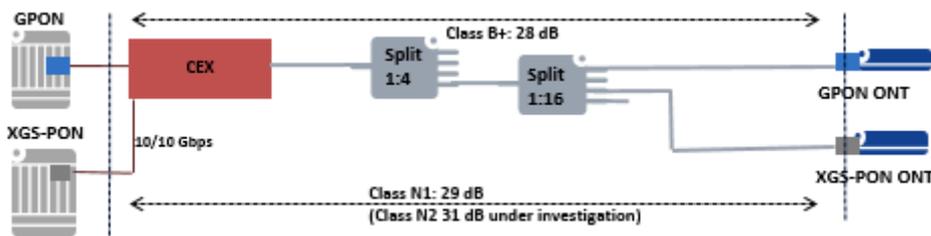


Figura 35 Balance total de pérdidas en despliegue con tecnología XGS-PON y GPON

Por tanto, la tecnología XGS-PON vendría ya preparada desde su estándar para aguantar 1 dB más por la introducción del CEX. Sin embargo, para GPON que es una tecnología anterior, se aconsejaría trabajar con clase C+ con el coste que ello supone, aunque con B+ sería factible operar de forma eficiente. La mayoría de despliegues están dimensionados para menos de 28 dB de pérdidas en el balance total, por ese motivo, integrar la tecnología de XGS-PON en un despliegue de fibra donde había GPON es posible según demanda el estándar.

- La gestión, mantenimiento y control de las ONUs se realiza mediante tres canales llamados OAM integrado, PLOAM y OMCC:

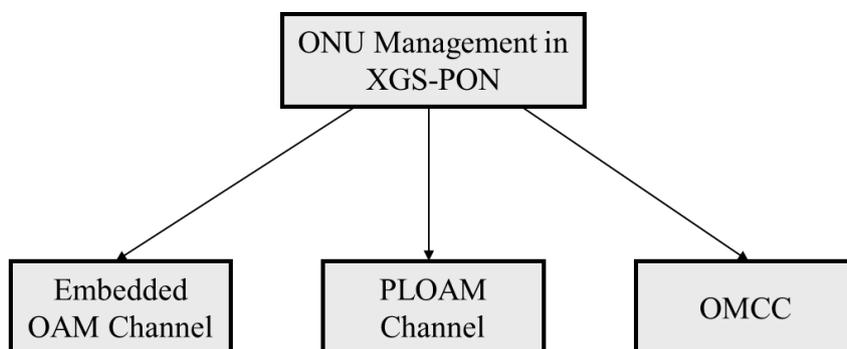


Figura 36 Canales para gestión de las ONUs de XGS-PON en el apartado C.6-4 del G.9807.1

- OAM embebido: se usa para el envío de información urgente para el sistema como por ejemplo las indicaciones de apagado de ONUs, la señalización de las asignaciones dinámicas de ancho de banda o la temporización de las ráfagas para el upstream.
 - PLOAM: se usa para toda la información referente a la gestión de la capa física que no se envía por el OAM embebido. Es una capa importante que tiene una estructura compleja y que se describe en la cláusula C.11 del G.9807.1 aunque no se entrará más en ella.
 - OMCC: Es el canal de control y gestión de las ONUs, lo que sería el canal donde se transmiten los mensajes de OMCI para la definición de los servicios y de la forma de trabajar de una ONU. Entre otras cosas, en este canal se envían los mensajes de OMCI llamadas ME (*Managed Entity*) o Entidades Gestionadas para la configuración de los XGEM Ports que tiene que reconocer una ONU, del procedimiento o ejecución de los tráficos que esos XGEM Ports lleven, de la gestión de los canales multicast, etc.
- Las ONUs y la OLT emplearán los XGEM Ports citados en este apartado para llevar el tráfico de cada cliente. Esos XGEM Ports son identificadores unívocos que separan de forma lógica cada tráfico dirigido a cada usuario en el escenario de punto – multipunto típico de los sistemas PON. A una ONU le podrán llegar uno o varios XGEM Ports. Además, habrá varios XGEM Port de carácter especial que podrán ser compartidos por todas las ONUs como ocurre para los empleados para llevar tráfico multicast como los canales de IPTV o el protocolo de encaminamiento RIP.

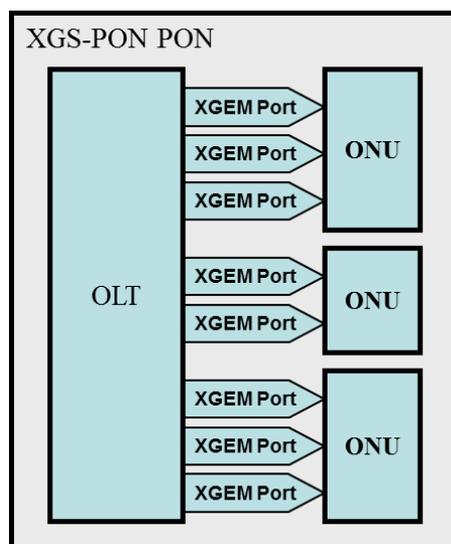


Figura 37 Esquema de envío de tráfico entre OLT y ONU en el apartado C.6-5 del G.9807.1

- Para el upstream se emplearán los mismos XGEM Ports pues son bidireccionales excepto los especiales para tráfico multicast que serán sólo

unidireccionales desde la OLT a las ONUs. En el upstream los XGEM Ports bidireccionales necesitarán un *Alloc-ID* o slot permitido de envío (el TCONT que se ha comentado en este trabajo anteriormente) para no chocar con otros envíos de otras ONTs. Un *Alloc-ID* podrá llevar uno o varios XGEM Ports

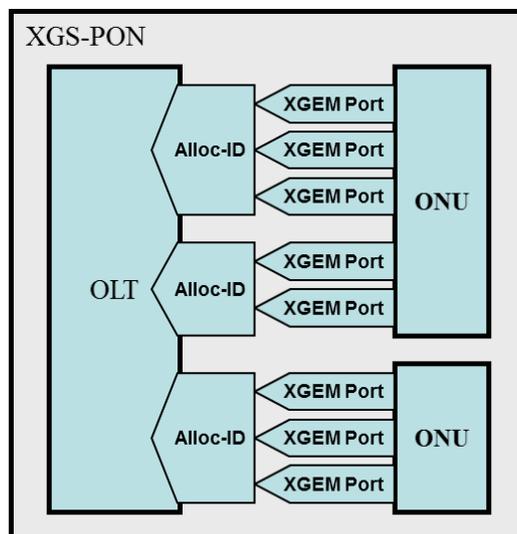


Figura 38 Esquema de envío de tráfico entre ONUs y OLT (up) en el apartado C.6-6 del G.9807.1

- Los identificadores de XGEM Ports podrán ser hasta 65535 posibles valores y se regirán por la siguiente tabla del G.9807.1.

XGEM Port-ID	Designation	Comment
0..1020	Default	Default XGEM Port-ID, which is implicitly assigned with and is equal to the ONU-ID. It identifies the XGEM port used by the OMCC traffic.
1021..65534	Assignable	If more than a single XGEM Port-ID is needed for an ONU, the OLT assigns additional Port-IDs to that ONU by selecting a unique number from this range and communicating it to the ONU using the OMCC. The values 1021 and 1022 shall not be assigned to XG-PON1 ONUs.
65535	Idle	Reserved for Idle XGEM Port-ID

Tabla 11 Valores de ID para los XGEM Ports apartado C.6-6 del G.9807.1

- Para facilitar la coexistencia entre tecnologías PON y para hacer posible que la configuración del XGS-PON y del NG-PON2 sean compatibles, se describe el uso de un identificador de puerto PON basado en una estructura de 32 bits donde 28 de esos bits son un identificador arbitrario o número administrativo y 4 bits son para identificar el canal de downstream empleado, es decir, la

longitud de onda que permite identificar si se trata de un XGS-PON o de un NGPON2 pues se emplean distintos rangos de nm. Para un sistema sólo de XGS-PON el G.9807.1 permite que estos 4 bits se pongan a cero tanto en un sentido como en otro, pues también existe un identificador del upstream que debe usar cada ONU para cada longitud de onda donde se sincronice.

- Las tramas enviadas entre OLT y ONUs serán las tramas XGEM y seguirán el siguiente esquema propuesto.

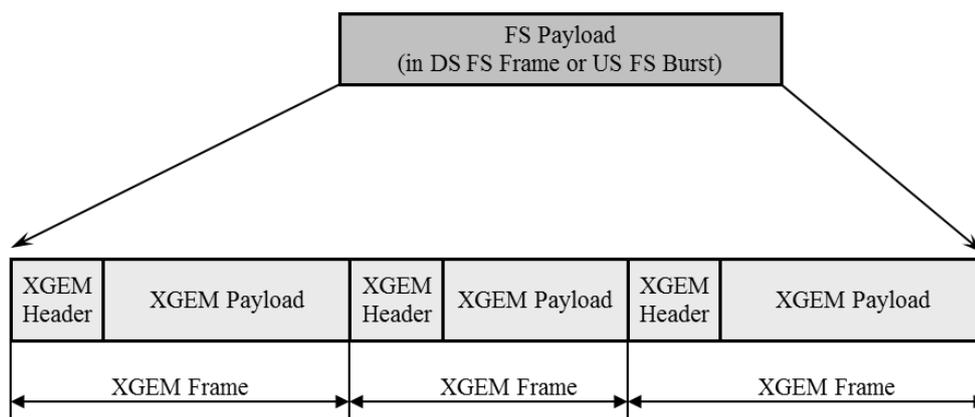


Figura 39 Estructura de trama de datos con tramas XGEM en apartado C.9-1 del G.9807.1

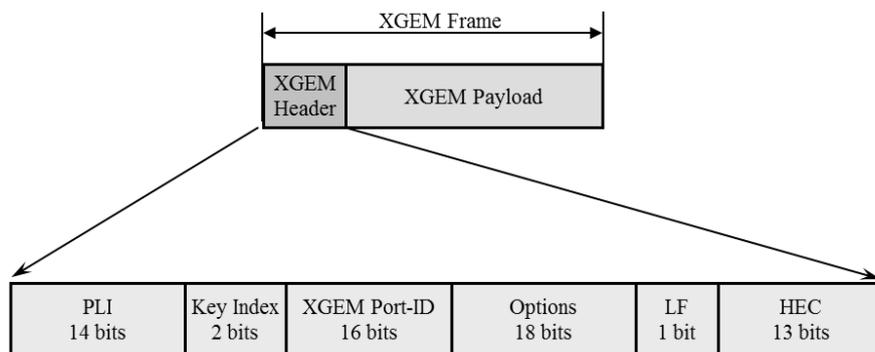


Figura 40 Estructura de una trama XGEM en apartado C.9-2 del G.9807.1

Siendo el campo más importante de una cabecera de trama XGEM el XGEM Port-ID que seguirá las indicaciones antes mencionadas.

- Sobre el campo XGEM Payload podrán ir distintos tipos de tráfico en base a varios protocolos como se recogen en el G.9807.1, siendo permitidos el Ethernet y el MPLS, lo que supone un avance en relación con el estándar G.984 de GPON pues en esta G.9807.1 se contempla la posibilidad de que este protocolo de conmutación por etiquetas usado de forma más general en

las redes IP troncales, en las redes de transporte o incluso en la Red de Agregación, llegue hasta la propia Red de Acceso.

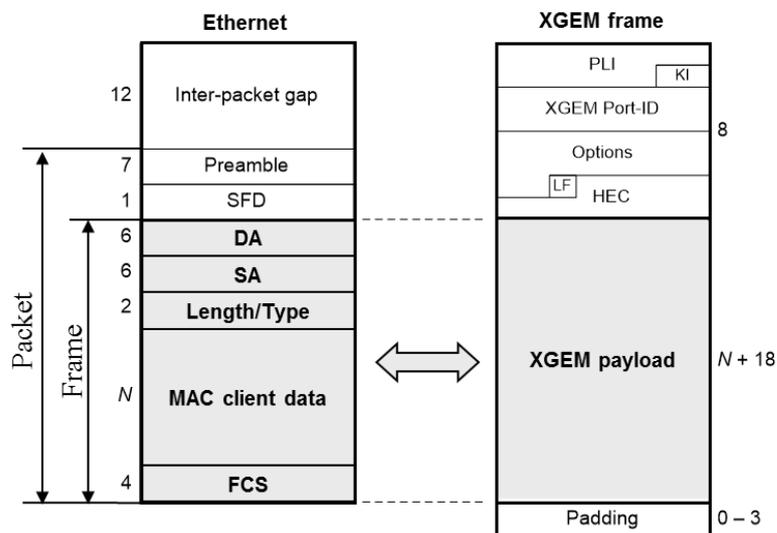


Figura 41 Encapsulamiento de trama Ethernet en trama XGEM en apartado C.9-5 del G.9807.1

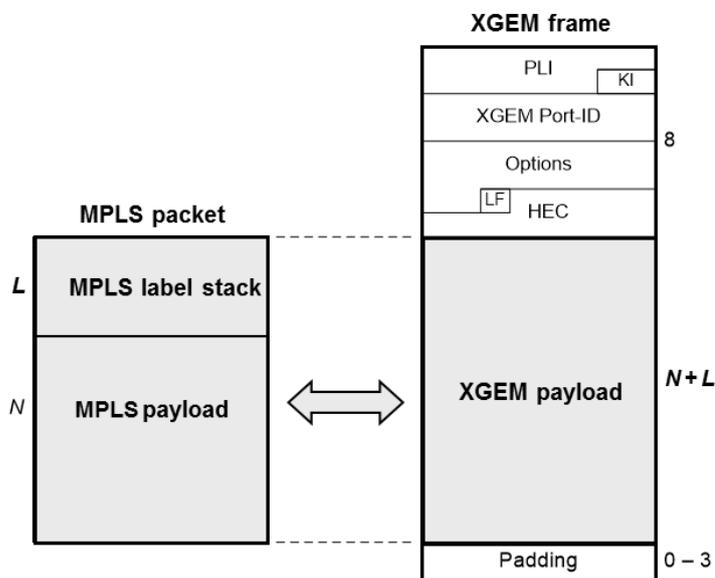


Figura 42 Encapsulamiento de paquete MPLS en una trama XGEM en apartado C.9-6 del G.9807.1

- El sistema para el envío de las tramas en upstream y los anchos de banda empleados seguirán las mismas directrices que las expuestas en el capítulo 2 para explicar este aspecto del GPON. La forma de trabajar con la asignación dinámica del ancho de banda del upstream, DBA, seguirá cualquiera de los dos métodos detallados, a saber, *status report* y *traffic monitoring*, de tal forma que

la OLT finalmente informará a las ONUs de cuándo transmitir en base al BWMAP como se indicó.

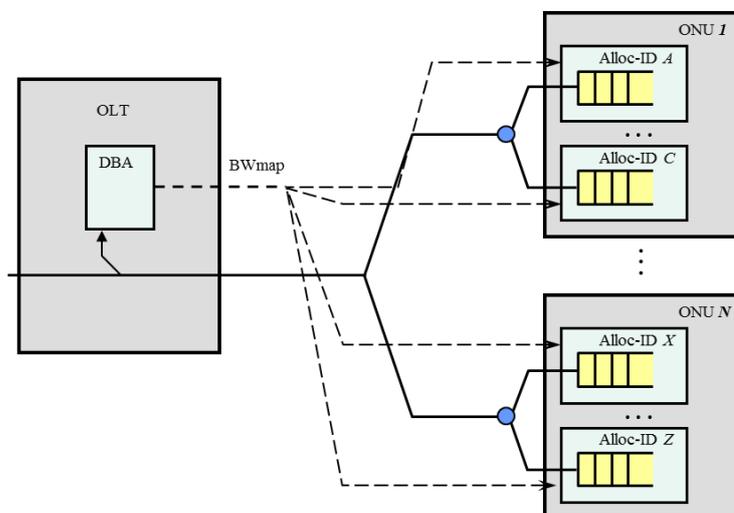


Figura 43 Abstracción del DBA para XGS-PON en apartado C.7-1 del G.9807.1

- Se permitirá el uso del algoritmo de corrección de errores FEC (*Forward Error Correction*) para corregir los errores que se puedan producir en el tramo de OLT – ONU. El uso del FEC consistirá en introducir bits de redundancia siguiendo el esquema propuesto para una codificación de tipo Reed-Solomon como se hacía en el GPON empleando palabras código, pero de distinta longitud para poder alcanzar el máximo posible de los 9.95328 Gbps en cada sentido del tráfico. Estos códigos serán los recogidos en el Anexo C.B del G.9807.1 cuyos tipos serán *RS(248,216)* y también el *RS(248,232)*. El uso del FEC implica una disminución de la máxima tasa posible y como se comprobará en el siguiente apartado del trabajo, estará por debajo de los 9 Gbps. En el G.9807.1 aparece la siguiente indicación de Bytes usados para datos y los usados como redundancia para la corrección de errores en total.

DS Nominal line rate, Gbit/s	9.95328	
DS PHY Frame Size, bytes	155520	
	FEC On	FEC Off
DS FS frame size, bytes	135432	155496

Tabla 12 Comparativa de tramas usando FEC o no para XGS-PON. Tabla C.8-1 del G.9807.1

Esto se traduce en las siguientes distribuciones de las tramas recogidas en el estándar G.9807.1 para cada sentido donde se observa la cantidad de bytes de

paridad que se insertan para proteger cada trama enviada o recibida por las ONTs.

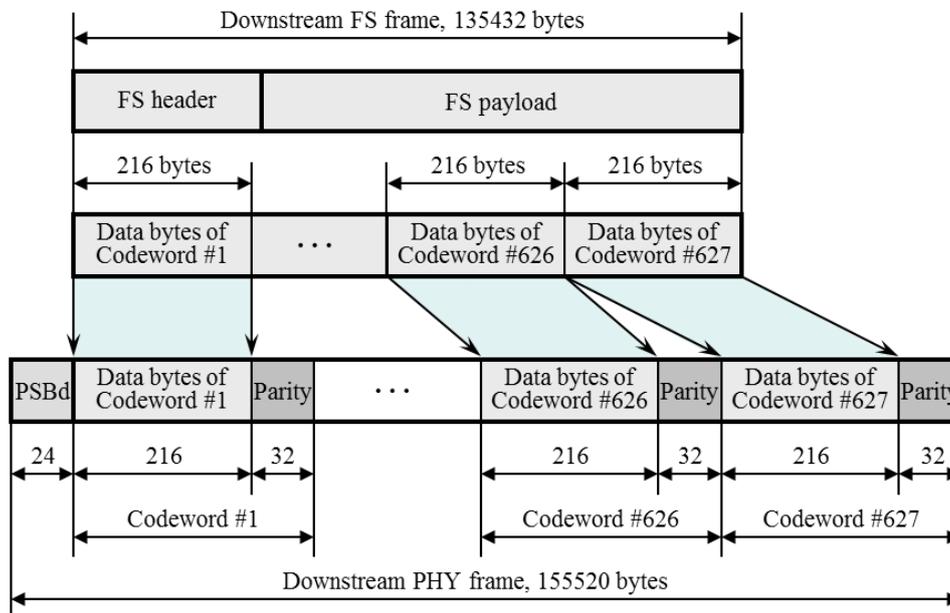


Figura 44 Inserción de palabras código FEC en downstream. Figura C.10-9 del G.9807.1

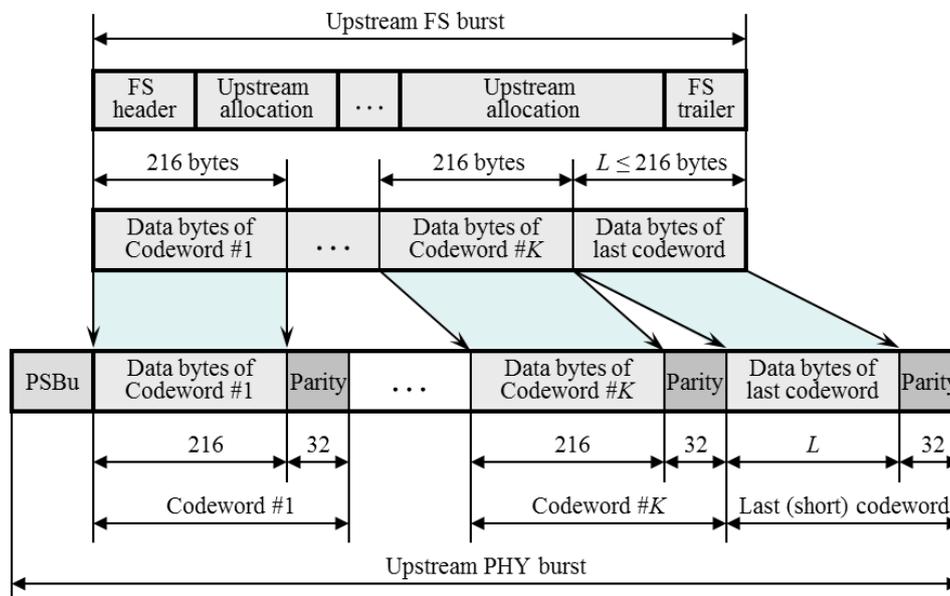


Figura 45 Inserción de palabras código FEC en upstream. Figura C.10-9 del G.9807.1

- Para un correcto y eficiente funcionamiento del XGS-PON a las velocidades de 10 Gbps simétricos que se viene enunciando en este trabajo, es necesario que

el sistema siga las directrices marcadas en la cláusula C.13.1 donde se establecen los siguientes valores para retardos y variaciones del retardo en un sistema con distancias máximas de 20 km:

- El tiempo de respuesta de una ONU ante mensajes de control de la OLT debe ser de 35 ± 1 microsegundo para que la OLT no entienda que esa ONU ha dejado de funcionar.
 - La variación del retardo de propagación por la fibra (en la ODN) será de 200 microsegundos máximo. Este valor es crítico para explicar el límite de distancia diferencial (20 km) entre las ONTs de un mismo puerto PON como se mencionó anteriormente.
 - La variación de retardo del tiempo de respuesta de una ONU será de 2 microsegundos.
- Para evitar solapes entre los envíos de las distintas ONUs que se conectan y trabajan en un puerto PON se establecerán los siguientes valores umbrales para el deslizamiento de ventana (*Drift Of Window*) donde una ONU invade la ventana o banda de guarda que limita su slot correcto; y el TIW (*transmission interference warning*) que permite a una OLT entender que una ONU intenta suplantar a otra en su slot y la cataloga como Rogue ONU y la podría desactivar:

	In integer bit periods for specified line rate		In time units (approximately)
	-	9.95328 Gbit/s	
DOW _i	-	± 32 bits	± 3.2 ns
TIW _i	-	± 64 bits	± 6.4 ns

Tabla 13 Valores umbrales para detectar ONU Rogue. Tabla C.13-1 del G.9807.1

Por último, para explicar las características del XGS-PON, se vuelve a destacar que para poder mezclar sus longitudes de onda con las de GPON es necesario un elemento llamado CEx o Elemento de Coexistencia, que no es más que el multiplexor-demultiplexor de amplio espectro capaz de realizar ese objetivo. Este elemento deberá ser de interés para el operador pues queda fuera del estudio del balance óptico en el estándar donde sí se exige un valor total para el enlace entre OLT y ONT. Además, deberá tener una serie de requisitos a valorar por cada operador en función de las exigencias que imponga a través de Especificaciones de Requisitos donde parámetros como la directividad, aislamiento y pérdidas de inserción deberán ser exigentes con el fin de que penalizar la convivencia de otras tecnologías ni tampoco el balance total de pérdidas ya estudiado previamente sobre redes FTTH desplegadas para GPON.

Además, el CEx deberá centrar la atención del operador en aspectos como su diseño, pues normalmente en las centrales donde se instalan las OLTs los racks tienen unas medidas concretas que deben respetar los acuerdos de Seguridad, de Consumo y de Medioambiente que se hayan firmado entre fabricante y operador. De esos racks saldrían fibras ópticas a conectar a distintos repartidores que llegarían ya a las canalizaciones y posterior salida hacia la calle y después a la casa de los clientes previo paso por arquetas, canalizaciones, etc.

Es por tanto importante que el operador y el fabricante de equipos PON asuman el impacto que el implantar un CEx conlleva y sea lo más modular posible de tal forma que se considera un posible modelo, el emplear un mismo chasis de OLT donde se equipen varias tarjetas de GPON y de XGS-PON de donde salgan fibras que sean interceptadas por el CEx y así que ambas tecnologías usen la misma ODN. Así el CEx y la OLT con varias tarjetas compartirían el mismo rack. Un ejemplo sería la siguiente figura donde aparece un CEx que integra una doble conexión para varios puertos de varias tecnologías, haciendo posible dos salidas ya combinadas, de esta forma, se reduciría a la mitad el espacio empleado por cada CEx.

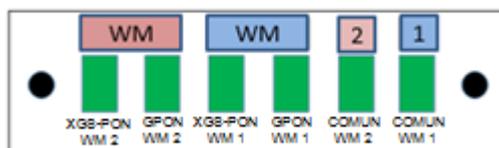


Figura 46 Posible diseño de un CEx con cuatro entradas y dos salidas independientes

También quedaría como propuesta para su estudio la posibilidad de interceptar fibras fuera del rack, en otros sitios como los repartidores que también pueden ser factibles de estar enrackados en otros sitios de la central (este caso respondería a un modelo de OLTs distintas para cada tecnología en distintos puntos de la central) y así poder llevar una fibra hacia 64 clientes que puedan ser de una tecnología o de otra. Además, será importante determinar qué valor de potencia óptica refleja en el puerto de entrada para de la lambda para XGS-PON (XGS-PON WM1 y 2 en el anterior esquema propuesto) pues según el G.9807.1, para una velocidad de 10 Gbps simétricos sobre XGS-PON la relación entre la potencia recibida y la potencia reflejada debe ser igual o superior a 15 dB (cláusula B.9.2.6.2 para el downstream y B.9.2.6.3 para el upstream).

Esto daría mucha escalabilidad al operador pues sobre el mismo chasis de OLT se podrían instalar tarjetas donde puedas dar a unos clientes potenciales como las empresas un ancho de banda mayor que a los residenciales sin tener que entrar en congestión de los puertos PON y ya con la instalación hecha de 64 clientes posibles limitaría los costes y problemas de despliegue. Aunque eso sí, de los 64 clientes potenciales de un puerto PON se quedarían en menos (por ejemplo 32 clientes para cada tecnología); pero eso mejoraría la experiencia de cliente pues haría que, en

menor probabilidad, la congestión y el abuso del ancho de banda del upstream para GPON fueran un problema para el sistema.

En cualquier caso, se ha podido observar a lo largo del capítulo que el sistema XGS-PON mejoraría el rendimiento de los anchos de banda de los clientes y permite una infraestructura parecida a la del GPON, incluso en su forma de trabajar y de configurar el equipamiento. Además deja una puerta abierta para su convivencia y compatibilidad con la entrada de equipamiento de NG-PON2, pero por ahora y desde el punto de vista de un operador, habría que centrarse en las pruebas de convivencia y de uso estabilidad del XGS-PON con el GPON y por ese motivo aparece el siguiente apartado de este capítulo 3 donde se pasan a detallar las primeras pruebas realizadas en España sobre un equipo de demo XGS-PON con carácter precomercial del cual no se pueden publicar fotos y por exigencia de confidencialidad se evita dar el nombre del suministrador, sin embargo, vale para aportar un carácter empírico al presente Trabajo.

3.3 Resultados de la demo de XGS-PON y convivencia con el GPON

En este apartado se pretende demostrar algunas de las características descritas en el capítulo anterior. Los resultados de la demo realizados en laboratorios de Telefónica significan la primera toma de contacto con la tecnología XGS-PON a nivel nacional. Por exigencias de confidencialidad no se pueden mostrar fotos del equipamiento, pero sí los escenarios de pruebas que bien podrían valer para otros laboratorios, por ejemplo, universitarios para la investigación de esta tecnología.

En la demo se han empleado los siguientes recursos:

- **OLT con una tarjeta compatible con XGS-PON.** A día de hoy, las tarjetas de XGS-PON son distintas de las que se emplean para clientes comerciales de GPON.
- **Óptica modular mediante XFP** (transceiver que puede operar a 10 Gbps de transmisión de datos) para XGS-PON que trabaja a 1270 y 1577 nm para upstream y downstream respectivamente. Emitiendo a una potencia cercana a los 2.5 dBm.
- **Software (SW) de OLT compatible con las tarjetas de XGS-PON.** Uno de los factores más importantes a tener en cuenta para el estudio de costes es la posible migración de SW del equipamiento. En este caso sería necesario y por ese motivo, el coste total por cliente de XGS-PON en este año 2016 estaría cercano al x4 si se toma como referencia el coste por desplegar un usuario de GPON actualmente. La ventaja del equipo estudiado es que el chasis de OLT

es compatible para incorporar tarjetas de GPON, XGS-PON y NG-PON2 siendo escalable con previsión a futuro.

- **Dos ONTs de empresas con XFP compatible con XGS-PON.** Además, como se comprobó en la explicación del estándar, el interfaz UNI de la ONT para el caso de la demo podía ser de 10 Gbps ópticos o 1 Gbps Ethernet eléctricos para conectar un router de cliente.
- **Generador y simulador de tráfico** (*IP Performance Tester*) del suministrador IXIA modelo *Optixia XM12* para comprobar los máximos del estándar con y sin FEC sobre varios servicios. Además, esto permite simular tráfico para ver casos de congestión y de funcionamiento de los equipos.
- **Analizador de espectros óptico** (OSA) de *Anritsu modelo MS9710B* con conectores de entrada FC/APC y de amplio espectro de análisis.
- **Elemento CEx** (o CE) para conectar una fibra de un puerto GPON y otro de XGS-PON, básico para pruebas de convivencia.
- **Una ONT de GPON con router conectado y desco para IPTV.** Equipamiento normal de un cliente residencial de Telefónica.
- **Splitter de 1:32** para obtener distintas fibras para poder conectar varios ONTs y formar una ODN con menor grado de división que en un despliegue comercial normal pero válido para la demo.
- **Splitter de 80/20** para derivar un 20% de la señal que sale del CEx hacia el OSA para observar las lambdas debido a la disponibilidad de equipamiento en el laboratorio. El OSA no puede poner en paso es necesario que sea terminación del esquema de fibra, de ahí que un porcentaje se lleve para su análisis y según se conecte este divisor se podrá observar una longitud de onda de downstream o de upstream.
- **Medidor de potencia EXFO** modelo *PPM-350B-EG* para longitud de onda de GPON y de tercera lambda. Permite observar la potencia óptica por la longitud de onda de XGS-PON, de 1577 nm, pues aunque la lambda de medición es 1550 nm, el filtro del medidor no es tan selectivo.
- **Fibras y conectores** varios para conectar los distintos equipos de la ODN entre OLT y ONTs.
- **Atenuador variable** de *JDS Fitel* de amplio espectro para probar la sensibilidad introduciendo pérdidas por atenuación simulando el efecto de aumentar la distancia o conectores en paso.

De esta forma se obtiene el siguiente escenario de trabajo para la demo:

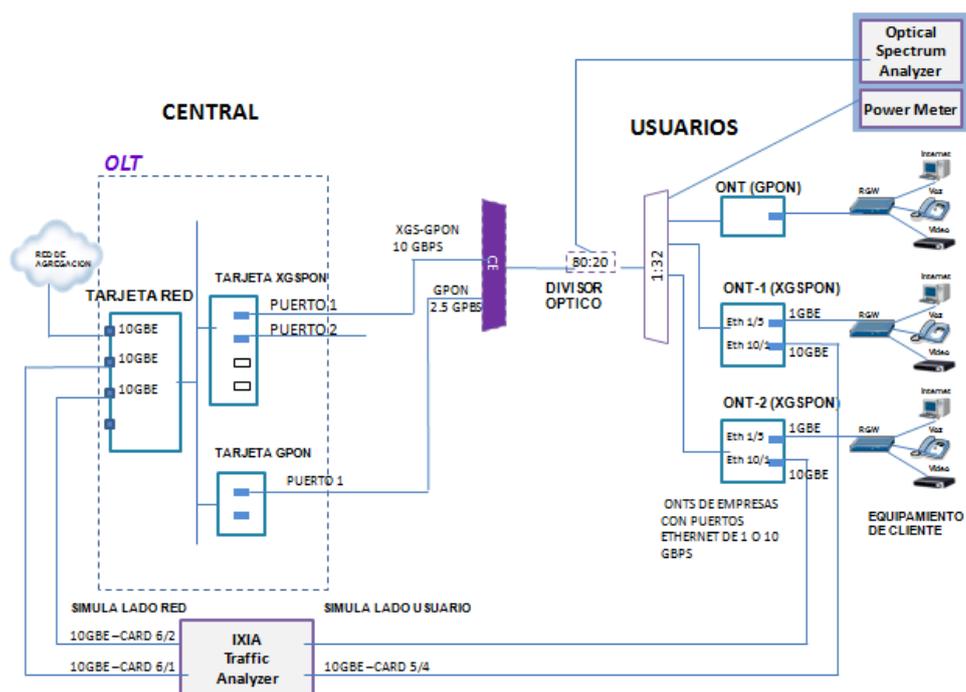


Figura 47 Escenario de pruebas demo XGS-PON con convivencia GPON

Además, se emplean los siguientes servicios simulados y/o reales para la demo, cuya información o arquitecturas se muestran a continuación. Se inyectan tráficos simulados en downstream y upstream de servicios de conectividad o Internet, asociados a conexiones donde se emplea doble tag de VLAN, conocido como QinQ [30] y de IPTV unicast, lo que correspondería a servicios de Vídeo o Contenidos Bajo Demanda. En el tráfico de servicios reales se emplean conexiones de Internet o Conectividad Residencial, canales multicast de IPTV, Contenidos Bajo Demanda y VoIP.

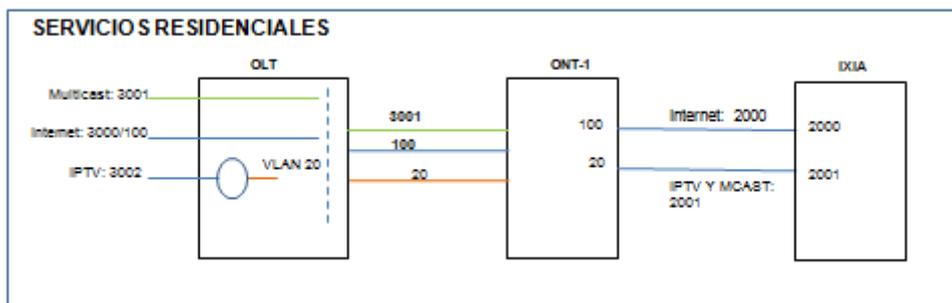


Figura 48 Configuración de servicios residenciales simulados para una ONT

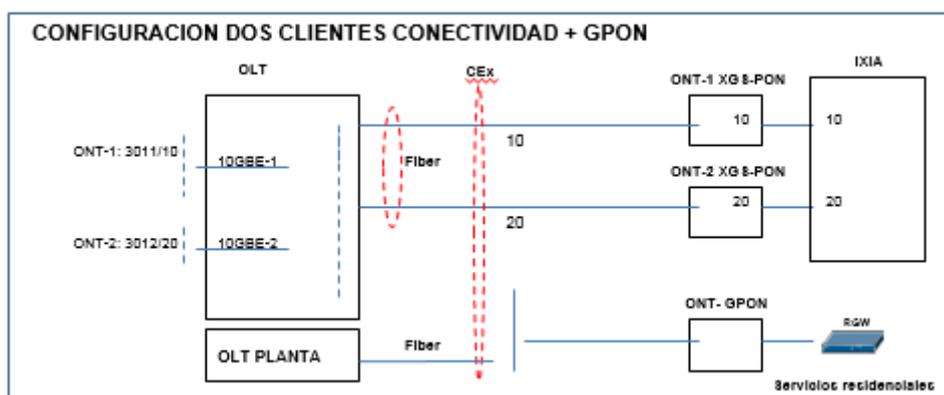


Figura 49 Configuración de servicios conectividad simulados más ONT real de GPON

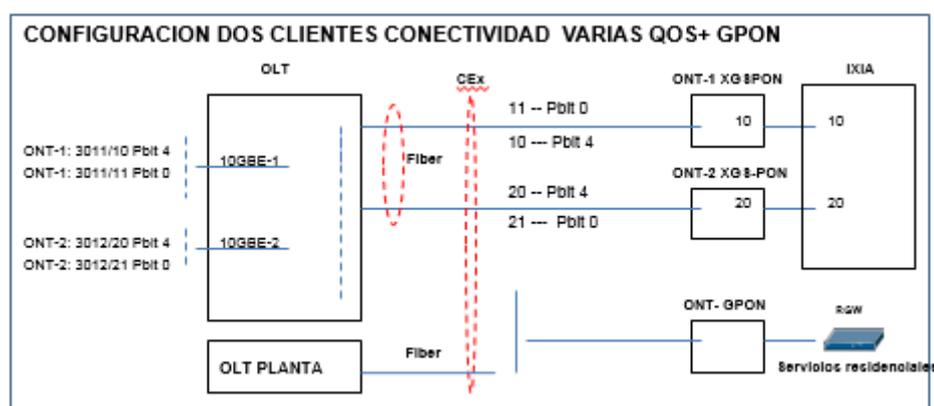


Figura 50 Configuración de servicios conectividad con distinto QoS más ONT real de GPON

En las configuraciones mostradas se tienen diferentes escenarios que posee cualquier operador a nivel nacional para sus clientes.

- En la *Figura 48* se muestra el empleo de varios servicios usando para su diferenciación distintas etiquetas de VLAN. La ONT, como viene siendo habitual en GPON, puede cambiar la etiqueta 802.1q en función del puerto de salida y del servicio que sea. Incluso puede agrupar un tráfico de IPTV Bajo Demanda con streams de multicast, pues este último se emplea sólo en sentido downstream. El IXIA simularía los equipos de cliente como generador y analizador de tráfico que es.
- En la *Figura 49* se muestra una configuración de dos clientes simulados de conectividad (como si fueran empresas) sobre XGS-PON más otro de GPON que vendría de otra OLT que estaría configurado y funcionando como un cliente normal de Telefónica. Se interceptarían las dos fibras que saldrían de cada puerto PON de cada OLT, uno en cada tecnología y se emplearían tres ONTs: dos de XGS-PON y una tercera de GPON. A cada ONT de XGS-PON le llegaría el tráfico por distintos XGEM Ports y con distinta VLAN. Se emplearían

los puertos de 10 Gbps que poseen para llevar el tráfico al IXIA y poder probar cómo se adapta el sistema a inyecciones de hasta 20 Gbps sobre 10 Gbps que se tendría entre ONTs y OLT.

- En la *Figura 50* se muestra una configuración de dos clientes simulados de conectividad sobre XGS-PON más otro de GPON que vendría de otra OLT que estaría configurado y funcionando como un cliente normal de Telefónica. La diferencia con la figura anterior es que este escenario permite demostrar cómo actúa la OLT en casos de congestión del tráfico en su puerto PON, de tal forma que debería dejar pasar todo el tráfico posible del pbit 4 y descartar tráfico del pbit 0. Se interceptarían las dos fibras que saldrían de cada puerto PON de cada OLT, uno en cada tecnología y se emplearían tres ONTs: dos de XGS-PON y una tercera de GPON. A cada ONT de XGS-PON le llegaría el tráfico por distintos XGEM Ports y con distinta VLAN.

El protocolo de pruebas que se siguió se basaba principalmente en pruebas de estabilidad de la tecnología, de convivencia, sensibilidad óptica y funcionamiento de distintos servicios con anchos de banda variados. De esta forma se obtuvieron los siguientes resultados:

- **Estabilidad y provisión de ONT de XGS-PON.** Se muestra la longitud de onda de downstream y de upstream en un equipo real de XGS-PON que debe cumplir el rango expuesto en la Tabla 7 del presente Trabajo. Se usaría el escenario de la *Figura 48*.

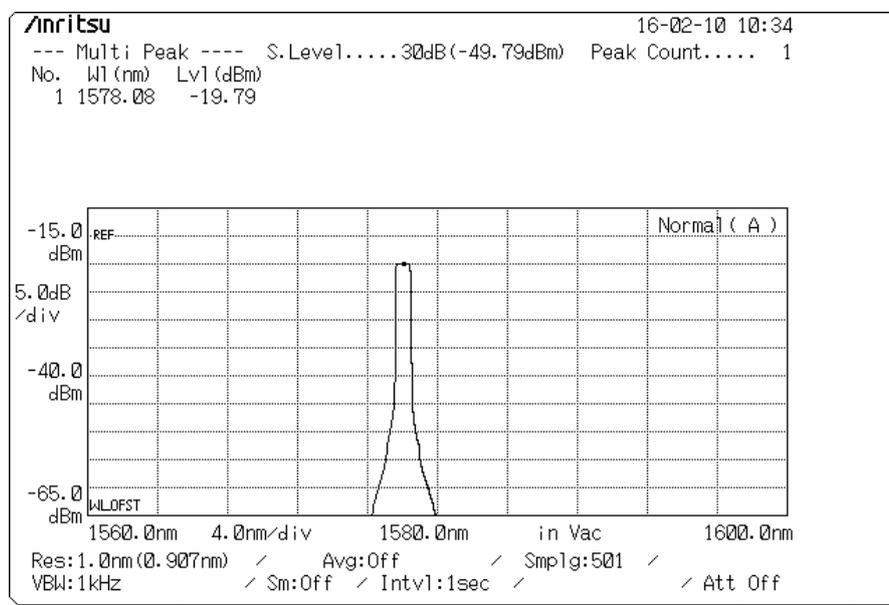


Figura 51 Longitud de onda de trabajo de downstream XGS-PON a 1578 nm

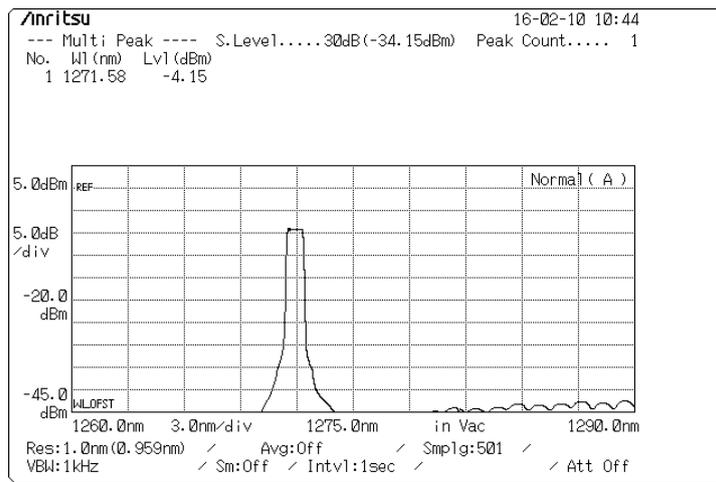


Figura 52 Longitud de onda de trabajo de upstream XGS-PON a 1271 nm

Como se puede comprobar, en ambas figuras, las lambdas de trabajo difieren un 1 nm aproximadamente lo que especifica el estándar. Esto no es problema pues se toma como valor nominal dentro de una ventana de trabajo indicada por el estándar G.9807.1 de 1575 y 1580 nm para el downstream y de 1260 a 1280 nm para el upstream. El resultado fue una perfecta sincronización entre OLT y ONT.

- **Convivencia de XGS-PON con GPON.** Se observa en las siguientes ilustraciones las longitudes de onda de downstream y de upstream en convivencia de cada tecnología, demostrando que sobre la misma ODN funcionan ambas y no se “elimina” una por inyectar la otra. Se usaría el escenario de la *Figura 49*.

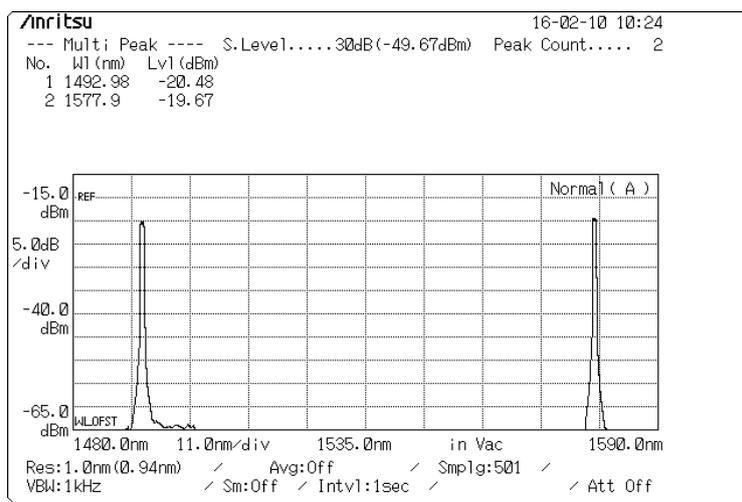


Figura 53 Longitud de onda de trabajo de downstream XGS-PON a 1578 nm y GPON a 1492 nm

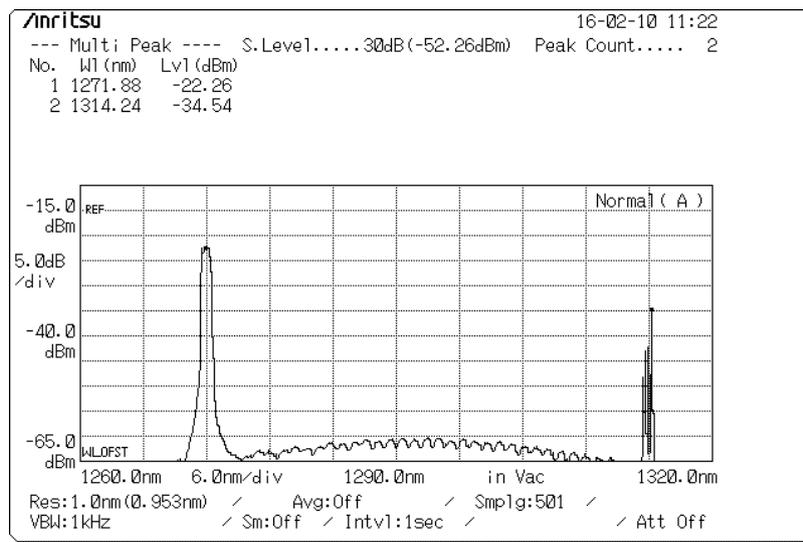
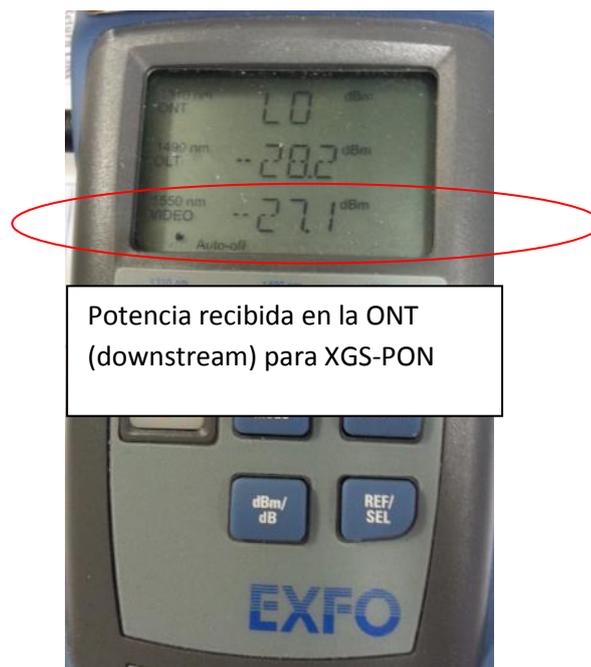


Figura 54 Longitud de onda de trabajo de upstream XGS-PON a 1271 nm y GPON a 1314 nm

Como se puede observar, la potencia recibida de la lambda de GPON es menor que la de XGS-PON debido a problemas con el conexionado de fibras pues podría haber bucles o ángulos rectos que dificulten el buen funcionamiento de las fibras, pero durante la demo el servicio funcionaba correctamente dado el buen comportamiento en términos de sensibilidad de las ONTs. Además, cabe destacar que la potencia recibida en el OSA es sólo el 20% de lo que se transmite dado el divisor puesto en paso, por ese motivo se recomienda no valorar el valor de potencia óptica y sí el valor de las longitudes de onda que vienen a demostrar que están dentro del rango de trabajo exigido por el G.9807.1 y que las tecnologías de GPON y XGS-PON conviven perfectamente. Al no poder ponerse en paso se necesita un porcentaje de la potencia para que este analizador pueda recoger las lambdas de trabajo de forma aislada.

- Sensibilidad de la ONT:
 - o La potencia mínima recibida fue de -33 dBm antes de perder la sincronización con la OLT empleando FEC. Esto se consiguió gracias al empleo de un atenuador variable de amplio espectro que permitió ir aumentando la atenuación en el último tramo de fibra, entre el splitter y la ONT. Cabe destacar que la ONT empleada era un modelo precomercial preparado para entornos de empresas (enrackable, con más puertos que una ONT de residencial, otro consumo, etc).



Potencia recibida en la ONT (downstream) para XGS-PON

Figura 55 Ejemplo de medición con medidor EXFO sobre XGS-PON

La sincronización de la ONT se recuperó tras bajar la atenuación 3 dB, viéndose en el medidor una potencia recibida de -30 dBm. En caso de no emplear FEC la ONT se hubiera quedado entre los -31 y -32 dBm de potencia recibida mínima para poder funcionar. Según el G.9807.1, la potencia mínima recibida o sensibilidad trabajando a 10 Gbps en downstream debe ser menos o igual a -28 dBm. Por tanto en esta prueba de sensibilidad se demostró que este equipo tiene características ópticas mejores que el mínimo exigible por el G.9807.1.

- La potencia recibida por la ONT sobre la demo sin introducir pérdidas adicionales con el atenuador, sólo con el montaje visto en *Figura 47* donde estarían presentes las pérdidas debido al divisor de 80/20, splitter de 1:32 (15 dB) y conectores varios, fue como se muestra a continuación donde aparece el dato de potencia recibida en la OLT, que sería la recibida de cada ONT tras el paso por la ODN y/o todo el montaje.

ONT	Potencia óptica recibida ONT (dBm)	Potencia transmitida ONT (dBm)	Potencia recibida en OLT (dBm)
ONT 1 - XGS-PON	-22.924	2.406	-20.7
ONT 2 - XGS-PON	-23.010	2.464	-21.1

Tabla 14 Valores ópticos de partida en montaje demo XGS-PON

Estos valores vistos en las pruebas perfectamente se pueden corresponder con un despliegue real ya que el balance total de pérdidas llegaría alrededor de 25 – 26 dBs.

Cabe destacar que el elemento CEx no fue objeto de estudio como tal en las pruebas de la demo pues fue un elemento experimental del suministrador no sujeto a las especificaciones del operador. No fue posible medir valores de aislamiento de potencias reflejadas de las señales de distintas tecnologías, ni directividad, pero estos parámetros fueron reportados por el suministrador siendo:

- Aislamiento > 60 dBs.
 - Directividad > 50 dBs.
-
- En las pruebas de estabilidad se perseguía confirmar que la caída de una tarjeta de GPON o de XGS-PON no afectaban a las ONTs de distintas tecnologías. De igual forma, apagar una ONT de GPON no afecta al rendimiento de tráfico de XGS-PON siendo el resultado el esperado respecto a la convivencia de tecnologías puesto que caídas de tarjetas o de puertos de una tecnología no afecta a la otra. Se usaría el escenario de la *Figura 47*.
 - En las pruebas de tráfico se obtuvieron distintos resultados en función de los servicios configurados y de los objetivos del test. A continuación, se muestra el resumen de las mismas:
 - **Máximo throughput** empírico del **downstream** de XGS-PON **sin FEC** sobre una única ONT con tráfico de internet simulado desde generador. Se inyectan 9.850 Gbps. Se reciben 9.823 Gbps. Se usaría el escenario de la *Figura 48*.



Figura 56 Tasa máxima DL medido a nivel Ethernet sobre ONT XGS-PON

Este resultado muestra el máximo valor posible que se obtendrá en casos de congestión en el downstream de un puerto PON para XGS-PON sin FEC. Es importante para un operador saber qué máximos posibles son los hallados para establecer futuros cuellos de botella o entender la tecnología en sí.

- **Máximo throughput** empírico del **upstream** de XGS-PON **sin FEC** sobre una única ONT con tráfico de internet simulado desde generador. Se inyectan 9.663 Gbps. Se reciben 9.672 Gbps. Se usaría el escenario de la *Figura 48*. Al igual que en la prueba anterior, la velocidad alcanzada es muy alta, sobrepasando el 95% de eficiencia.

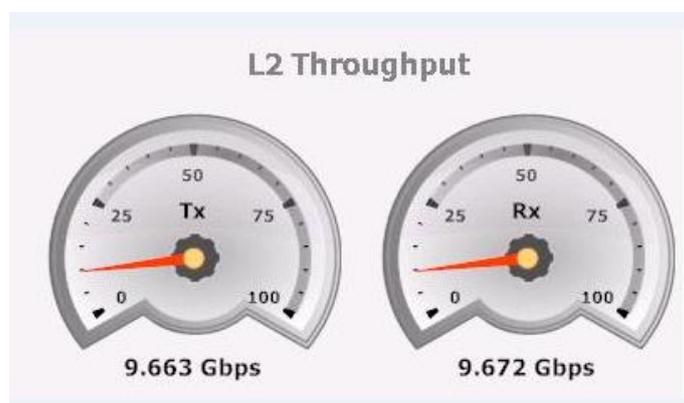


Figura 57 Tasa máxima UL medido a nivel Ethernet sobre ONT XGS-PON

- **Máximo throughput** empírico del **downstream** de XGS-PON **sin FEC** sobre **dos ONTs** con tráfico de internet o conectividad simulado desde un generador de tráfico. Se inyectan 26 Gbps con destino hacia las dos ONTs para poder entrar en saturación del puerto PON. Se reciben 9.834 Gbps entre las dos ONTs, es decir, cada una recibe la mitad y gracias al generador se puede observar el total de tráfico recibido. Se usaría el escenario de la *Figura 49*.



Figura 58 Tasa máxima DL medido a nivel Ethernet sobre dos ONTs XGS-PON

Como se puede comprobar es prácticamente igual al caso de máxima tasa recibida por una sola ONT de XGS-PON.

- **Máximo throughput** empírico del **upstream** de XGS-PON **sin FEC sobre dos ONTs** con tráfico de internet simulado desde generador. Se inyectan 9.58 Gbps entrando en saturación del puerto PON gracias al generador que permite inyectar a cada ONT la mitad de esos 9.58 Gbps. Se reciben 9.606 Gbps en total, un poco más del inyectado debido a que el generador de tráfico recibe en upstream 4 bytes más por trama debido a la segunda vlan por el QinQ que simula el tráfico de internet en un despliegue comercial español actual. Se usaría el escenario de la *Figura 49*.



Figura 59 Tasa máxima UL medido a nivel Ethernet empleando dos ONTs XGS-PON

- **Máximo throughput** empírico del **downstream** de XGS-PON sin FEC sobre una única ONT con tráfico de internet simulado desde generador. Con tramas especiales tipo **jumbo frame** de 9000 bytes (recogido en el G.9807.1) como se vio en el apartado anterior. Se usaría el escenario de la *Figura 48*.

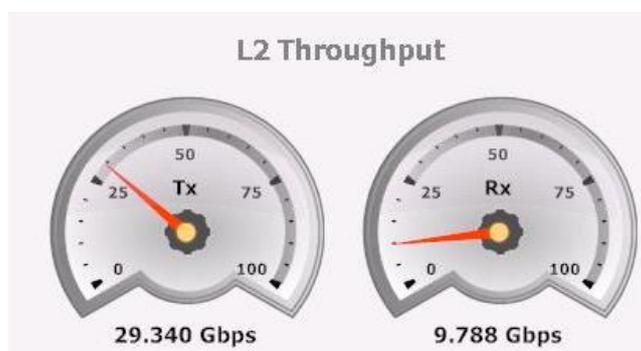
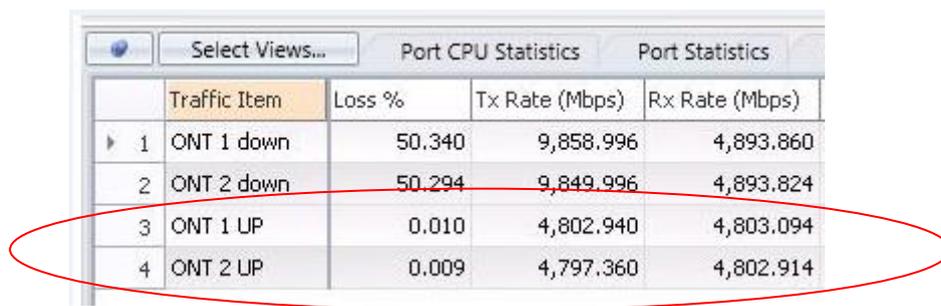


Figura 60 Tasa máxima DL medido a nivel Ethernet sobre una ONT XGS-PON con jumbo frame sin FEC

- **Máximo throughput empírico del upstream** de XGS-PON sin FEC sobre dos ONTs con tráfico de internet simulado desde generador. Con tramas especiales tipo **jumbo frame** de 9000 bytes (recogido en el G.9807.1) como se vio en el apartado anterior. Se obtiene un valor de máximo recibido de 9.6 Gbps aprox. Se usaría el escenario de la *Figura 49*.

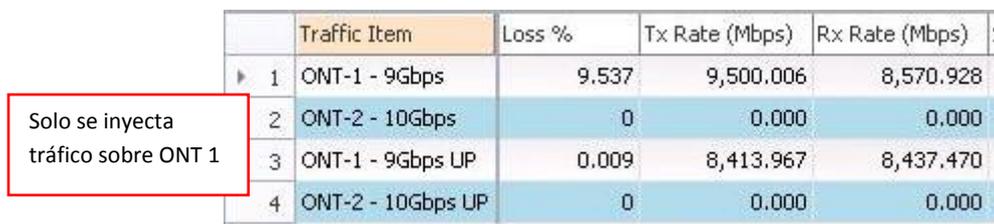


Select Views...		Port CPU Statistics		Port Statistics	
	Traffic Item	Loss %	Tx Rate (Mbps)	Rx Rate (Mbps)	
1	ONT 1 down	50.340	9,858.996	4,893.860	
2	ONT 2 down	50.294	9,849.996	4,893.824	
3	ONT 1 UP	0.010	4,802.940	4,803.094	
4	ONT 2 UP	0.009	4,797.360	4,802.914	

Figura 61 Tasa máxima UL medido a nivel Ethernet sobre dos ONTs XGS-PON con jumbo frame sin FEC

Se demuestra en esta prueba que sin FEC se alcanzan de nuevo tasas muy altas y que además, los equipos soportan las jumbo frame de 9000 Bytes. Además, se observa que el tráfico inyectado en downstream pierde por igual debido a que la calidad de los tráficos es la misma en esta prueba y que en el upstream cada ONT transmite el máximo que puede (4.8 Gbps) que se reciben prácticamente sin pérdidas en el generador actuando como receptor.

- **Máximo throughput empírico de los sentidos del tráfico de XGS-PON con FEC sobre una única ONT** con tráfico de internet simulado desde generador. Se reciben 8.570 Gbps en DS y 8.44 Gbps en US aprox. Se inyectan tramas de 1482 bytes, un tamaño visto en las redes actuales. Se usaría el escenario de la *Figura 49*.



	Traffic Item	Loss %	Tx Rate (Mbps)	Rx Rate (Mbps)	
1	ONT-1 - 9Gbps	9.537	9,500.006	8,570.928	
2	ONT-2 - 10Gbps	0	0.000	0.000	
3	ONT-1 - 9Gbps UP	0.009	8,413.967	8,437.470	
4	ONT-2 - 10Gbps UP	0	0.000	0.000	

Figura 62 Tasa máxima medido a nivel Ethernet sobre una ONT XGS-PON

Como se puede comprobar trabajando sobre una sola ONT con FEC se llega al **máximo valor de ancho de banda posible de 8.6 Gbps aproximadamente para el downstream y de 8.5 Gbps para el upstream**. Estos valores serían los de referencia para obtener el máximo ancho de banda a compartir en las mejores condiciones entre todas las ONTs. Sin embargo, cada vez que se fueran configurando y activando nuevas ONTs, al tener que aplicarse bandas de guarda para evita solapes entre las ONTs, la eficiencia descendería en un porcentaje no analizado para este Trabajo de Fin de Máster.

- Máximo throughput empírico de los sentidos del tráfico de XGS-PON con FEC sobre dos ONTs con tráfico de internet simulado desde generador. Se tasas muy parecidas al caso de antes. Se usaría el escenario de la *Figura 49*.

	Traffic Item	Loss %	Tx Rate (Mbps)	Rx Rate (Mbps)
▶ 1	ONT-1 - 9Gbps	54.769	9,500.006	4,285.464
2	ONT-2 - 10Gbps	54.769	9,500.006	4,285.464
3	ONT-1 - 9Gbps UP	0.042	4,194.776	4,198.817
4	ONT-2 - 10Gbps UP	0.042	4,195.182	4,198.650

Figura 63 Tasa máxima medido a nivel Ethernet sobre dos ONTs XGS-PON

- Máximo throughput empírico de los sentidos del tráfico de XGS-PON con FEC sobre dos ONTs con tráfico de internet simulado desde generador. Prueba con tamaño de trama de 100 Bytes donde se ve la penalización por *overhead* en forma de eficiencia menor del tráfico recibido. Se usaría el escenario de la *Figura 49*.

	Traffic Item	Loss %	Tx Rate (Mbps)	Rx Rate (Mbps)
▶ 1	ONT 1 down	49.229	8,200.003	3,996.691
2	ONT 2 down	49.229	8,200.003	3,996.694
3	ONT 1 UP	2.578	3,857.362	3,907.332
4	ONT 2 UP	2.579	3,847.693	3,906.678

Figura 64 Tasa máxima medido a nivel Ethernet sobre dos ONTs XGS-PON con tramas 100 Bytes

- **Máximo throughput** empírico de downstream del tráfico de XGS-PON con FEC sobre dos ONTs con tráfico de internet simulado desde el generador pero con distintas calidades donde se puede observar la forma de trabajar en **casos de congestión en un puerto PON**. El QoS que se aplica es de tipo *Strict Priority* donde se deja pasar el 100% del

tráfico más prioritario y se tira del que menos. En la siguiente prueba se trabajó con prioridades distintas marcadas a nivel 2 por el campo 802.1p (integrado dentro del estándar IEEE 802.1Q [15]). Se usaría el escenario de la *Figura 50*.

Select Views...		Port CPU Statistics	Port Statistics	Gl
	Traffic Item	Loss %	Tx Rate (Mbps)	Rx Rate (Mbps)
1	ONT 1 down qos 4	0.001	2,000.000	1,994.614
2	ONT 2 down qos 4	0.001	2,000.000	1,994.614
3	ONT 1 down qos 0	24.393	2,999.995	2,262.044
4	ONT 2 down qos 0	24.393	2,999.995	2,262.049

0% de pérdidas en calidad pbit 4 y 24% sobre pbit 0

Figura 65 Tasa máxima medido a nivel Ethernet sobre dos ONTs XGS-PON con calidades distintas

- **Convivencia de distintos servicios sobre dos ONTs de XGS-PON.** Donde una de ellas se configura con servicios típicos residenciales de IPTV + internet siendo éste simétrico de 300 Mbps. Y otro con un ancho de banda de empresas empleado como por ejemplo 3 Gbps en downstream y 2 Gbps en upstream. Todo con FEC pues en un despliegue normal comercial es prioritario que llegue la señal sin errores a llegar a máximos de eficiencia. Se usaría el escenario de la *Figura 47* configurando dos ONTs de XGS-PON para residencial simulado.

	Traffic Item	Loss %	Tx Rate (Mbps)	Rx Rate (Mbps)
1	ONT-1 inet resi	0.000	300.003	299.146
2	ONT-1 -inet resi UP	0.000	298.004	298.889
3	ONT 2 UP	0.000	1,849.998	1,853.922
4	ONT 2 down qos 0	0.000	2,999.995	2,991.904
5	ONT-1 iptv resi down	0.000	56.000	56.000
6	ONT-1 iptv resi up	0.000	0.902	0.902

ONT 2 con servicios simulado empresa

Figura 66 Convivencia de servicios empresa + residencial 300M sobre XGS-PON con FEC

Como se observa, el resultado de la prueba demuestra que este tipo de tráfico y de servicios se podría dar (al menos en entornos simulados) siendo las pérdidas de paquetes de 0%.

- Convivencia de distintos servicios sobre dos ONTs de XGS-PON. Donde una de ellas se configura con servicios típicos residenciales de IPTV + internet siendo éste simétrico de 500 Mbps. Y otro con un ancho de banda de empresas empleado como por ejemplo 3 Gbps en

downstream y 2 Gbps en upstream. Todo con FEC pues en un despliegue normal comercial es prioritario que llegue la señal sin errores a llegar a máximos de eficiencia. Se usaría el escenario de la *Figura 48* y *Figura 49* una mezcla de ambos simulando dos clientes distintos.

	Traffic Item	Loss %	Tx Rate (Mbps)	Rx Rate (Mbps)
▶ 1	ONT-1 inet resi	0.000	499.996	498.573
2	ONT-1 -inet resi UP	0.000	499.996	501.425
3	ONT 2 UP	0.001	1,997.197	1,986.740
4	ONT 2 down qos 0	0.000	3,000.001	2,991.904
5	ONT-1 iptv resi down	0.000	56.000	56.000
6	ONT-1 iptv resi up	0.000	1.002	1.002

Figura 67 Convivencia de servicios empresa + residencial 500M sobre XGS-PON con FEC

- **Convivencia de servicios de empresas con tasas simétricas sobre dos ONTs de XGS-PON.** Todo con FEC pues en un despliegue normal comercial es prioritario que llegue la señal sin errores a llegar a máximos de eficiencia. Con tamaño de trama de 1482 Bytes. Se usaría el escenario de la *Figura 49*.

	Traffic Item	Loss %	Tx Rate (Mbps)	Rx Rate (Mbps)
▶ 1	ONT 1 down	0.000	299.998	299.189
2	ONT 2 down	0.000	299.998	299.189
3	ONT 1 UP	0.000	299.998	300.790
4	ONT 2 UP	0.000	299.998	300.826

	Traffic Item	Loss %	Tx Rate (Mbps)	Rx Rate (Mbps)
▶ 1	ONT 1 down	0.000	500.003	498.648
2	ONT 2 down	0.000	500.003	498.648
3	ONT 1 UP	0.000	500.003	501.347
4	ONT 2 UP	0.000	500.003	501.347

Figura 68 Convivencia de servicios empresas simétricos sobre dos ONTs XGS-PON con FEC con 1482 Bytes

Esta tecnología es capaz de soportar perfectamente tasas simétricas.

- Convivencia de servicios de empresas con tasas simétricas sobre dos ONTs de XGS-PON. Todo con FEC pues en un despliegue normal

comercial es prioritario que llegue la señal sin errores a conseguir máximos de eficiencia. Con tamaño de trama de 100 Bytes donde se puede observar una eficiencia menor en cuanto al tráfico recibido que en el caso anterior para el downstream y el mayor ancho de banda para el upstream precisamente por el mismo efecto del overhead comentado pues se introducen 4 bytes más por la segunda etiqueta de la vlan QinQ empleada para este servicio simulado de conectividad. Se usaría el escenario de la *Figura 49*.

	Traffic Item	Loss %	Tx Rate (Mbps)	Rx Rate (Mbps)
▶ 1	ONT 1 down	0.000	300.000	288.000
2	ONT 2 down	0.000	300.000	288.000
3	ONT 1 UP	0.000	300.000	311.998
4	ONT 2 UP	0.000	300.000	312.000

	Traffic Item	Loss %	Tx Rate (Mbps)	Rx Rate (Mbps)
▶ 1	ONT 1 down	0.000	500.000	480.000
2	ONT 2 down	0.000	500.000	480.000
3	ONT 1 UP	0.000	500.000	520.014
4	ONT 2 UP	0.000	500.000	519.983

Figura 69 Convivencia de servicios empresas simétricos sobre dos ONTs XGS-PON con FEC con 100 Bytes

Como **conclusión** de las pruebas realizadas y los resultados de la demo sobre XGS-PON se extrae que:

- La tecnología está muy cerca de ser madura para su uso comercial.
- La simetría en términos de máximo ancho de banda con y sin FEC permite trabajar sin problemas con varias ONTs de XGS-PON con perfiles simétricos. La simetría en las tasas máximas obtenidas permite un mayor ancho de banda a repartir entre los usuarios lo cual permitiría con mayor probabilidad dar las velocidades comprometidas en los contratos y, además, poder dar mucha capacidad a empresas, sobre todo para el upstream. Se recuerda que el máximo eficiente de GPON para este sentido del tráfico era cercano al 1 Gbps y con XGS-PON se tienen alrededor de 9 veces más
- Sobre un mismo PON de XGS pueden convivir distintos servicios sin pérdidas sobre ellos.
- Los resultados sobre los máximos con y sin FEC empíricos demuestran que las tasas expuestas en el estándar son factibles.

Cálculos teóricos Draft XGS-PON	
Tasa nominal DL (Gbps)	9,9533E+09
trama XGS-PON total (Bytes)	155520
trama XGS con FEC (Bytes) sin cabeceras	135432
trama XGS sin FEC (Bytes) sin cabeceras	155496
Tasa DL con FEC (Gbps)	8,67E+09
Tasa DL sin FEC (Gbps)	9,9517E+09

Tabla 15 Cálculos teóricos y resumen de máximo ancho de banda según G.9807.1



Figura 70 Tasas recibidas obtenidas en demo XGS-PON con y sin FEC

- El elemento CEx no introduce apenas pérdidas en paso para el balance óptico y aunque en el G.9807.1 no se añade su atenuación al estudio de los niveles ópticos, el operador debe tener en cuenta este punto y su diseño, así como el de los conectores para las fibras pues estos pueden ser SC/APC, SC/PC y es responsabilidad del operador tomar la decisión pertinente de cara a la implementación de su ODN. Además, el operador deberá tener en cuenta otros factores del CEx como su dimensión donde se puede englobar en un mismo equipo o cassette dos o más multiplexores, posibles tecnologías a multiplexar como por ejemplo si se prepara un escenario para una futura incorporación del NG-PON2, etc.
- La sensibilidad medida y las pérdidas soportadas están por encima de los valores que aconseja el estándar para la clase N1. En el G.9807.1, N1 comprende entre un valor máximo de pérdidas de 29 dB y mínimo de 14 dB. En los resultados de la demo se han trabajado con pérdidas máximas cercanas a los 34 dB. Sin embargo, este resultado depende de los componentes usados, del fabricante, etc, pero siempre se debe igualar o superar los valores marcados por el estándar para estos estudios ópticos.

Por tanto, como se puede comprobar en este apartado, a pesar de la celeridad en los trabajos de los suministradores para poder obtener equipamiento de XGS-PON

comercial antes que la propia definición de una serie oficial de estándar dentro de la ITU-T, la tecnología permite trabajar sin problemas con ONTs de GPON y de XGS-PON sobre la misma ODN. Además de demostrar que XGS-PON en realidad sí aporta unos términos de anchos de banda máximo cercanos a los 10 Gbps simétricos donde ONTs pueden competir por ese ancho de banda sin presentar problemas de estabilidad ante fallos, caídas, desconfiguraciones o pérdidas de sincronización.

Se demuestra por tanto que, a falta de que cada operador realice pruebas más exhaustivas y que se experimente con más ONTs conectadas a un puerto PON de distinto tipo (residencial o empresa), esta tecnología para finales de 2016 o principios de 2017 estaría disponible para responder a las necesidades que existen en el mercado.

3.4 Visión de negocio y del mercado del XGS-PON

Tras los ejemplos y los resultados de las pruebas realizadas sobre la demo de XGS-PON se puede comprobar que la tecnología está más madura de lo que se podría considerar dado el poco tiempo que se lleva trabajando en ello, aunque se aconseje desde el estándar G.9807.1 que se sea compatible con los láseres y las ópticas del estándar 802.3bk [24] como se ha indicado en apartados anteriores. Para demostrar que esta tecnología del XGS-PON ha sido un verdadero paso intermedio no planificado anteriormente, se muestra un gráfico de la evolución en años que se ha planteado en el marco de las tecnologías PON de la mano de distintos suministradores.

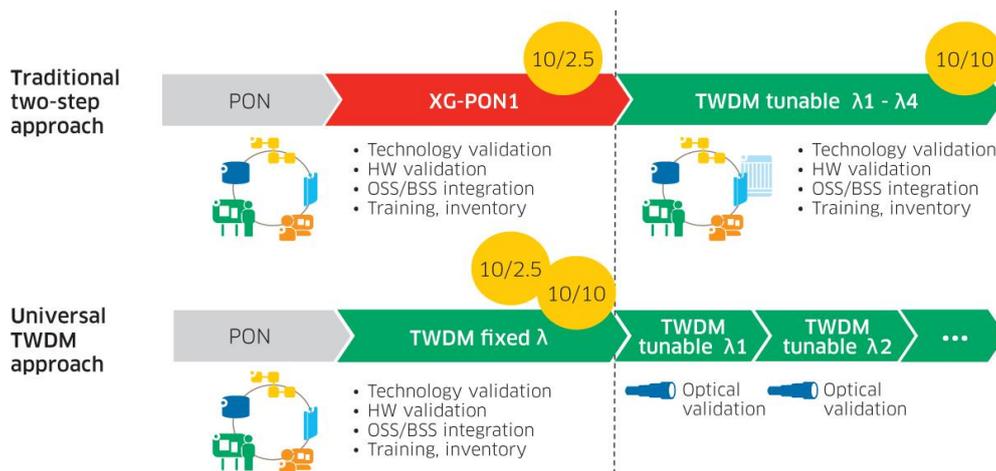


Figura 71 Evolución planificada por Alcatel-Lucent disponible en <https://techzine.alcatel-lucent.com/>

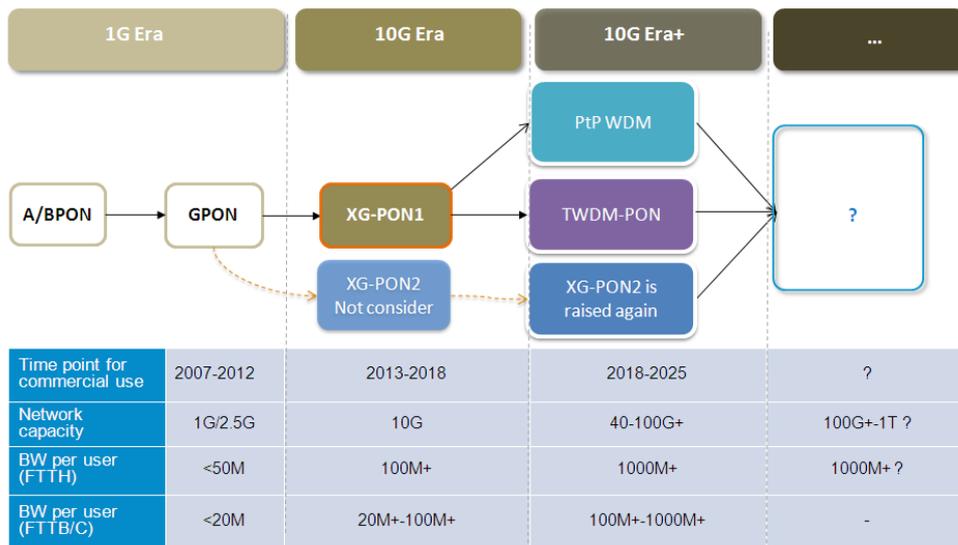


Figura 72 Evolución planificada por ZTE disponible en <http://www.zte.com.cn/>

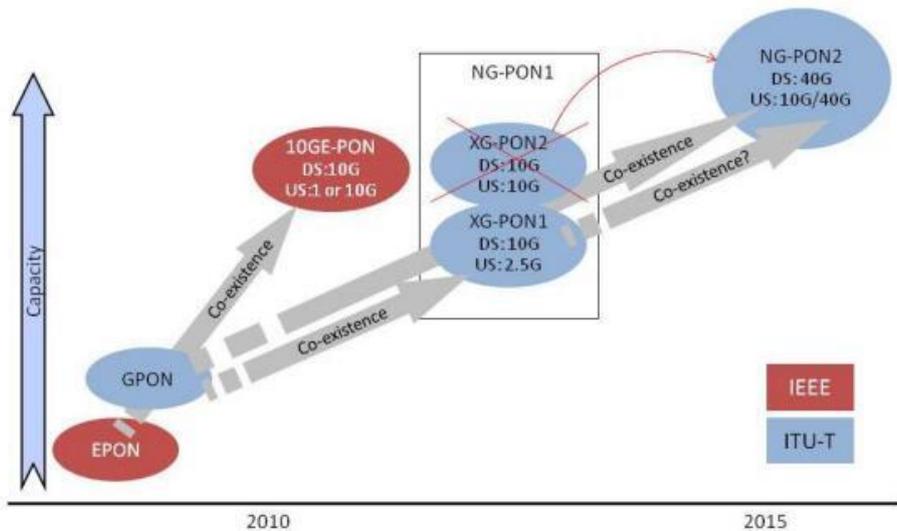


Figura 73 Evolución planificada por FiberOpticTel disponible en <http://www.fiberoptictel.com/>

Como se puede comprobar, se asumía una coexistencia con las tecnologías estandarizadas por la IEEE, pero a través de la ITU-T se presuponía un salto evolutivo desde del XG-PON1 (más costoso respecto al XGS-PON dada la capacidad que aporta cada uno) de la familia del NG-PON1 hasta el NG-PON2 sobre todo con longitudes de onda sintonizables e incluso fijas como anunciaba Alcatel-Lucent. La tecnología de XG-PON2 pasaba a ser no considerada entre el 2010 y el 2015, siendo este año cuando se empezaba a trabajar realmente en el estándar del XGS-PON asumiendo la reutilización de tecnologías más maduras como el 10 GE-PON como se ha indicado en anteriores apartados.

En este punto ciertos operadores de algunos países ya habían iniciado despliegues con el XG-PON1 para ver que la falta de simetría en la propia tecnología podía penalizar la eficiencia y la experiencia de sus clientes, pero la presión hizo que tuvieran que mejorar sus redes con lo que había en ese momento y eso fue lo que hizo que en el G.9807.1 explicado en el apartado 3.2 se incluyeran directrices para la coexistencia de XGS-PON y del XG-PON1. Los países donde sí se ha llevado un despliegue más allá de un trial de prueba han sido (según fuentes consultadas en los distintos suministradores de equipamiento de GPON al mercado español) entre 2012 y 2015:

- **China Telecom** en la provincia de Jiangsu/Zhejiang con más de 200.000 usuarios. En China, por la construcción de los edificios con plantas donde hay muchos pisos les interesa instalar una ONU en cada planta y llevar cable de cobre hasta las casas de tal forma que instalarían un FTTB (Fiber to the Building [22])
- **Etisalat** con un despliegue comercial para multi-servicio en clientes de empresa como hoteles en Burj Khalifa
- **Mobily** despliega 20000 unidades de ONTs de 10GPON con XGPON1 para usuarios de empresa y residenciales en el Middle East de EE.UU.
- **Bahrain Telecom, Indonesian, Sonet**, planifican despliegues entre 2014 y 2015 de clientes con XGPON1 y convivencia con GPON.
- **ZTE y Jazztel** colaboran desde 2014 en el despliegue comercial de XG-PON1 [31].

Durante esos años los costes de los equipos ONT sobre todo y de los láseres, de los elementos CEx y su instalación y de las tarjetas de las OLTs así como de posibles migraciones de SW de las mismas para poder soportar esta nueva tecnología hicieron que no se introdujera tanto en el mercado. Sin embargo, con el paso del tiempo se fueron abaratando los costes de tal forma que a fecha de 2014 tomando como referencia el coste total por cliente y por OLT para GPON, el coste del XG-PON1 fuera cuatro veces mayor.

	XGPON1 [10/2,5Gbps]	XGS-PON [10/10Gbps]	NG-PON2 [TWDM-PON]
Disponibilidad técnica primeros prototipos OLT	2009	2015Q4	2015-16
Disponibilidad técnica primeros prototipos ONT	2014	2016Q1	2015-16
Disponibilidad comercial OLT	2013	2016Q3 small-scale 2017 for large-scale	2016-18
Disponibilidad comercial ONT	2015Q3	2016Q3 small-scale 2017 for large-scale	2016-18
Disponibilidad de ONT residencial	2015Q3	2016Q3 small-scale 2017 for large-scale	2016-18
Disponibilidad de ONT de empresas	2015Q3	No plan	2016-18
coste OLT y ONT comparada con GPON	x4	x4	2016 → x10 2017 → x7 2018 → x5

Tabla 16 Evolución de disponibilidad y costes de distintas tecnologías PON

La tabla anterior muestra un resumen de distintos fabricantes que trabajan en el mercado español con equipamiento de sistemas PON. Como se puede comprobar, el mismo problema que han tenido operadores internacionales en distintos países los tendrán los operadores españoles y no es otro que el coste. Ese coste viene dado sobre todo por la disponibilidad de los equipos con opto-electrónicas más reducidas. Actualmente las soluciones planteadas para los equipos en casa de cliente, sobre todo, responden a hardware voluminosos donde hay muchos puertos Ethernet con la posibilidad de trabajar con 10 Gbps eléctricos y donde en sus “tripas” la funcionalidad de ONT no viene integrada en un chip, sino que aparece integrada en una tarjeta. Sigüentes evoluciones encaminadas a sistemas SoC (*System-on-a-chip*, metodología de reducir tamaño e integrar componentes en elementos cada vez más capaces como los chips) harán que los precios bajen.

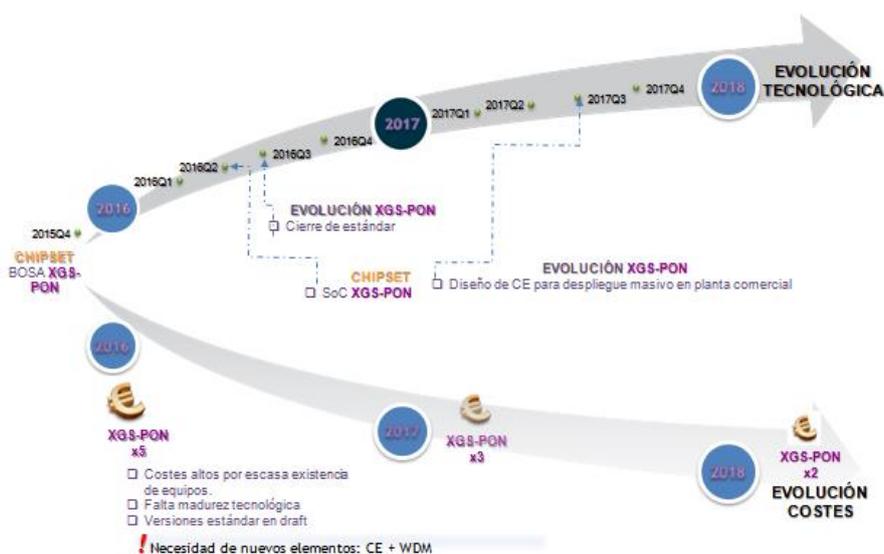
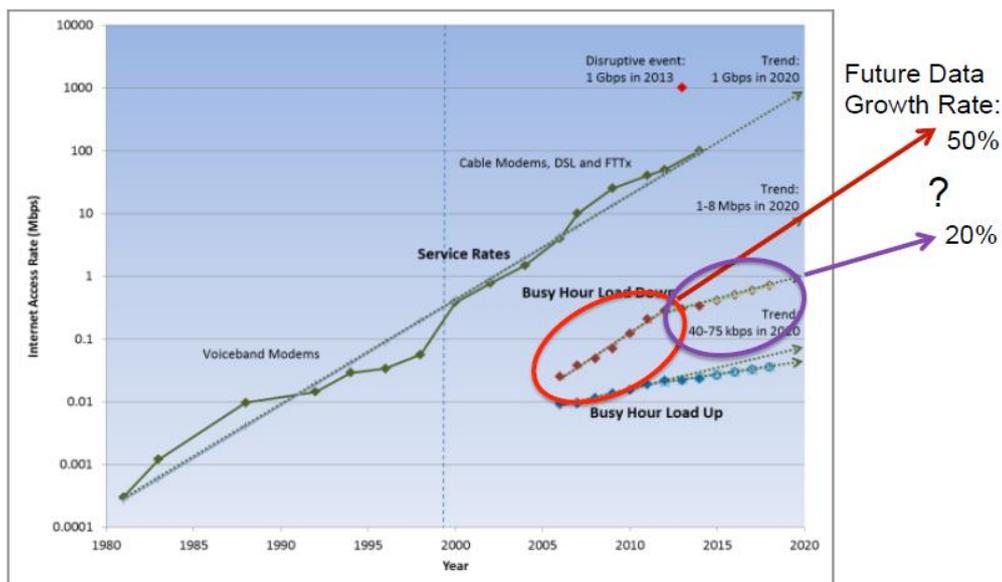


Figura 74 Evolución de costes y disponibilidad tecnológica para XGS-PON

Sin embargo, en el presente Trabajo se ha querido establecer una primera toma de contacto para expresar la posibilidad que se tiene de poder evolucionar a lo largo de estos años en los sistemas PON. La tabla demuestra que, aunque la disponibilidad técnica de la OLT de XG-PON1 fue en 2009, se ha tardado 5 años en tener ONTs disponibles para pruebas piloto, pero para XGS-PON en dos años se conseguirá recorrer ese camino por la posibilidad de usar las ópticas enunciadas por el 10GEPON del IEEE como demuestran los datos de costes entre el 2016 y el 2018. Durante estos años los siguientes factores harán que una evolución a XGS-PON sea positiva para los operadores y para el mercado español, no sólo por el precio, sino también por:

- La “**guerra**” de anchos de banda entre los operadores y las ofertas con anchos de banda simétricos. Más anchos de banda para empresas o clientes VIP.
- **Liberar ancho de banda** para clientes de GPON en zonas ya desplegadas con esta tecnología si se instala también XGS-PON. En este punto, poder ofrecer servicios VIP para clientes que estén en cobertura de XGS-PON y así disminuir la compartición de los ya existentes en GPON puede ser un factor positivo en la experiencia del usuario.
- La importancia que cobrará el **ancho de banda asegurado ante congestión** → XGS-PON permite repartir hasta 10 Gbps en upstream por los 1.25 del GPON actual, con lo que se pueden conseguir mejores ofertas ajustadas a clientes como empresas que dé importancia la factura que ya pagan respecto al residencial.
- La posible entrada de **otros competidores** → XGS-PON puede ofrecer un valor añadido a corto plazo para el operador que apueste por esta tecnología. Más capacidad para sus Redes de Acceso.
- La entrada de la nueva evolución del acceso indirecto llamado **VULA** [31] que exigirá anchos de banda simétricos de varios cientos de Mbps,
- La **consolidación de los servicios y la llegada de nuevos** → anchos de banda importantes para contenidos de TV en 4K, conexión total para Cloud (importancia del asegurado y de la capacidad del upstream).
- El **despliegue masivo** en zonas de menor área habitada → zonas *Green-Field* factibles de usar para primeras instalaciones. Aumento de la capacidad permitirá dar otras opciones a despliegues costosos en zonas FTTH, por ejemplo, llevar conexiones hasta equipos small cell que den LTE-Advanced a clientes a donde no llegue la FTTH hasta su casa de una forma eficiente.
- La **llegada del 5G** y la consolidación del **Internet de las Cosas** → demanda de capacidad.

Todos estos factores harán necesario que los operadores se planteen muy pronto la entrada de XGS-PON a pesar de los costes. Algo que ya ha descrito *Ryan McCowan*, *Product Manager* de Adtran [33] en septiembre de 2015 y que a continuación mostramos algunas de sus estimaciones (FEC se refiere a futuros nuevos servicios). Adtran es una empresa que en 2015 ha lanzado en Estados Unidos despliegues comerciales para empresas con XGS-PON.



Source: ADTRAN estimates, Busy Hour Load derived from published US Internet traffic statistics

Figura 75 Estimación de demanda tráfico upstream por usuario por Adtran

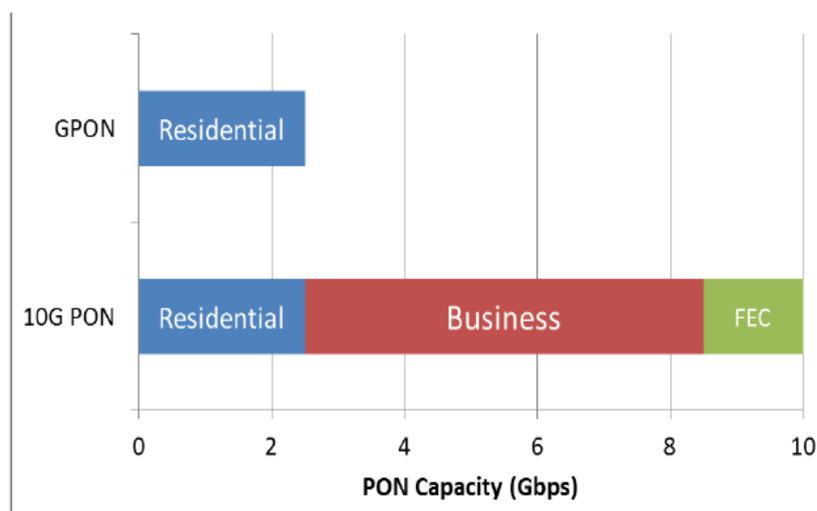


Figura 76 Distribución de ancho de banda según clientes y servicios por Adtran

Desde este Trabajo se expone el siguiente plan de negocio que haría posible una entrada progresiva y un retorno de costes más rápido:

- **Diseño del elemento CEx.** Este elemento es externo a las tarjetas y puertos XGS-PON y se deben tener en cuenta las atenuaciones en dB que afecten al estudio del balance óptico. En caso de tener que dotar de un acceso indirecto a otros operadores a través de este equipo será necesario una política de precios por usar la ODN. Exige una regulación. Además, exige una integración en el Sistema PON que sea factible para una instalación real como se muestra en la siguiente figura.

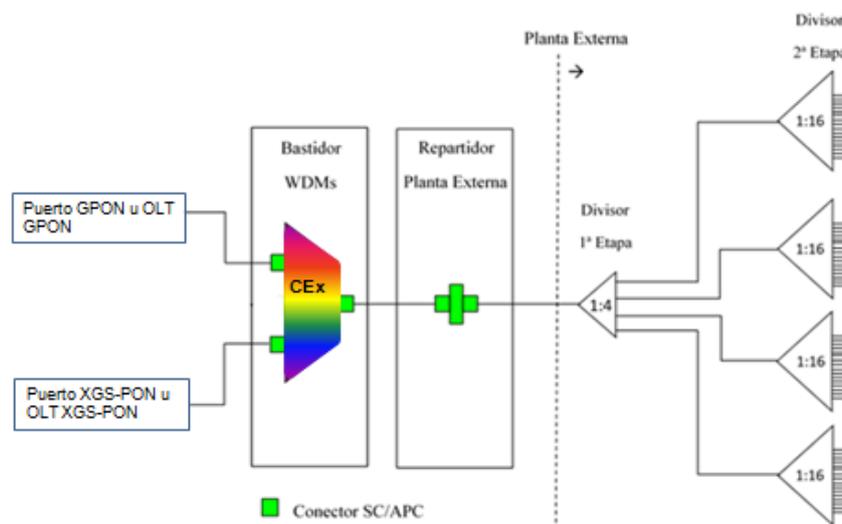


Figura 77 Esquema de conexiones y despliegue convivencia XGS-PON y GPON

Se deberán tener en cuenta aspectos como la potencia reflejada (pérdidas de retorno), directividad, aislamiento o pérdidas de inserción para el diseño del elemento CEx. No existe una especificación como tal de este elemento que exija unos valores determinados para las características mencionadas. Por ello, el operador deberá imponer unas condiciones mediante Especificación de Requisitos para poder elegir un equipo que se pueda integrar en su Sistema PON teniendo en cuenta que factores como las pérdidas de inserción perjudican al balance ya existente para el GPON y que además tienen una relación con el aislamiento, dado que cuanto menores son las pérdidas por inserción, menor es el aislamiento. Todos estos parámetros llevarán consigo un coste mayor o menor de la solución para un despliegue real. Por ese motivo, los suministradores de equipamiento deberán informar detalladamente de los parámetros de funcionamiento del CEx y explicar los procesos llevados a cabo para obtener esos valores.

- **Planificación** de instalación de tarjetas y chasis de XGS-PON en zonas empresariales o industriales. En estas zonas el impacto de la división del splitting puede ser menor y por tanto se pueden llevar pocas canalizaciones, menos coste de instalación y así poder dar más ancho de banda distribuido por cliente en casos de congestión.
- **Acuerdos** con empresas, clientes VIP del operador, para desplegar en zona piloto con anchos de banda simétricos de 1 Gbps potencialmente. La ONT de empresas de tipo modular está siempre antes disponible pues es un elemento de ingreso del suministrador más rápido que la residencial que debe tener entre otras cosas, un volumen reducido, un consumo reducido, etc.
- **Políticas de rebajas** y atención personalizada para clientes dentro de una fase de proyecto piloto.
- **Ofertas en función del ancho de banda asegurado.** Con XGS-PON el ancho de banda asegurado se multiplica por 8 respecto al GPON (en el sentido upstream), por lo que una política de precios a empresas puede ser en función del ancho de banda asegurado.
- Para los clientes de empresas, al ir su tráfico por otra longitud de onda distinta del GPON, en casos de coexistencia, no competirán por el ancho de banda a menos que se saturen los buses de datos de la propia OLT. En este punto, el **tráfico de las empresas deberá ir priorizado** sobre el tráfico de internet de los clientes. Se aconseja emplear configuraciones de nivel Ethernet con uso de VLAN para diferenciar el tráfico y, además, equipar a las OLTs con varios puertos hacia la Red de Agregación para trabajar con conexiones separadas entre clientes de empresa y residenciales. Si fuera una sola OLT sólo de XGS-PON, escenario *Green-Field* explicado en el G.9807.1 de XGS-PON, se aconseja dotar de más de un puerto de 10 Gbps mínimo a dicha tarjeta de conexión con la Red de Agregación.
- **Coexistencia** de GPON y de XGS-PON en puertos PON con pocos clientes activos para introducir poco a poco clientes de tipo piloto (experiencias previas al despliegue comercial) de tal manera que se permita encuestar a clientes para su satisfacción. Aunque XGS-PON trabaje con 10 Gbps simétricos, **los routers de los clientes y su equipamiento no están preparados para ese límite del ancho de banda**, por lo que toda experiencia piloto debería ir con un máximo de 1 Gbps. En caso de trabajar con coexistencia se puede entender que las señales de las distintas tecnologías vienen de distintas OLTs o de la misma. En ese caso habría que plantear soluciones de cableado para distintas OLTs y en caso de ser la misma, asegurar que las versiones SW de las tarjetas y de las OLTs sean compatibles. **Se recomienda desde el presente Trabajo instalar OLTs nuevas para XGS-PON e interceptar las fibras del GPON ya instalado con el elemento CEx para casos de convivencia.** Esto facilitaría la gestión de los clientes y de los equipos por parte del operador.

- **Atención personalizada en gestión de la red** para las zonas desplegadas en zonas piloto. Plan de contingencia ante fallos graves de servicio. Informar a centros de soporte para la resolución de problemas.
- **Publicaciones** para crear la demanda y dar a conocer su existencia.
- **Migrar cada cierto tiempo zonas y equipos a XGS-PON** para hacer más paulatino el despliegue y abaratar los costes de implantación y despliegue (CAPEX). Hacer posible que clientes de GPON puedan migrar a XGS-PON gracias a la coexistencia con el CEx a nivel técnico.
- En despliegues con coexistencia, **los sistemas de provisión y de gestión de las infraestructuras deberán tener en cuenta que habría al menos dos tecnologías** de sistemas PON con distinta longitud de onda. Será una tarea importante que durante las instalaciones se tengan en cuenta qué fibras se interceptan con el CEx para poder inyectar XGS-PON a despliegues ya de GPON. Se recomienda desde el presente Trabajo que el sistema de identificación de fibras en la central entre repartidores hasta salir a la calle mantenga la misma identificación, pero desde la fibra que sale del elemento CEx, y que se documente y gestione cada CEx identificando por puerto, tarjeta de puertos y OLT, cada fibra de entrada. Dicha asociación facilitaría la convivencia de GPON con XGS-PON.
- Los despliegues con coexistencia deberán contar con que para ahorrar costes y evitar nuevos despliegues en planta externa (o calle) **se deberá trabajar sobre divisiones de splitting de 1 a 64 clientes como caso normal** y real de estudio. Por este motivo, todo cliente que se pase de una tecnología a otra pertenecerá al árbol de fibra ya desplegado y no a uno nuevo por lo que si todos los clientes de GPON se migran se podría llegar a casos de *green-field* con solo XGS-PON, pero siempre se tendría en cuenta el balance de pérdidas como ya se ha comentado anteriormente. Este despliegue deberá soportar la introducción del elemento CEx.
- Considerar la posibilidad de trabajar con **equipos que integren ONT y router de cliente en un solo equipo** de tal forma que la problemática de los cableados Ethernet entre ONT y router que soporten los 10 Gbps y la existencia de los propios routers a esas velocidades, se supere mirando el beneficio del cliente residencial y la mejora en equipamiento y consumo.
- **Plantear evoluciones de las conexiones para conectar equipos de red móvil como nodos B, e-nodos B o Small Cell** que permitan disminuir los costes de instalación e infraestructura de las redes móviles aprovechando la capacidad aportada por el XGS-PON para las comunicaciones con LTE-advanced, por ejemplo. Los costes por funcionamiento y gestión del equipamiento irían aumentando según los clientes y el despliegue realizado, por ese motivo es aconsejable derivar los usos de la tecnología para justificar estos costes.

- **Posibilidad de escalabilidad:** la inversión realizada por un operador o un país para desplegar la fibra óptica actual exige una escalabilidad en varios conceptos para las futuras tecnologías sobre sistemas PON. Ya se ha comentado que sobre una misma ODN desplegada, pueden convivir GPON y XGS-PON dadas las diferentes lambdas de trabajo y los balances ópticos expuestos en los estándares e incluso migrar de GPON a XGS-PON, ODNs enteras. Sin embargo, a nivel de SW y de HW la posibilidad de que GPON y XGS-PON sean escalables sería un punto a favor en la introducción de las nuevas tecnologías. A nivel de HW, las tarjetas de puertos PON serían distintas, pero el chasis donde se conecten esas tarjetas e incluso las tarjetas controladoras pueden servir para ir introduciendo las nuevas tecnologías con un coste menor para el operador. A nivel de SW ocurriría lo mismo. Si una solución de XGS-PON pudiera presentar una configuración de los equipos que se adapte a NG-PON2 en cuanto al tratamiento de las diferentes lambdas, la migración sería menos costosa y compleja. Por lo tanto, se plantea incluso una escalabilidad tanto de los equipos actuales para XGS-PON, como para poder instalar sobre esos mismos equipos, tarjetas para soluciones de NG-PON2. Es decir, se recomienda que el operador exija en la medida de lo posible un planteamiento escalable de equipamiento de central. Ello abarataría los costes, haría posible mantener el conocimiento de instalación en el operador y mejoraría en cuanto a tiempo y complejidad la introducción de las nuevas tecnologías.
- Por último, el operador deberá tener en cuenta el salto o introducción en pocos años a NG-PON2. La problemática de NG-PON2 para provisionar un cliente e inventariarlo viene determinado por la lambda a donde se sintonice la ONT. Más adelante se verá este caso, pero **el operador deberá preparar sus sistemas para conocer cómo se configura un cliente con XGS-PON y qué diferencias hay con uno de GPON y de NG-PON2**. Será primordial que todo se prepare para el futuro y en este punto los sistemas de etiquetado y de gestión de fibras en central pueden variar en función de las conexiones entre OLTs, CEx y repartidores. Dicho inventariado debe ser registrado para su seguimiento en caso de averías o para el alta de clientes de donde se chequeará que las señales de las distintas tecnologías pasan por los elementos correctos y llegan al cliente especificado. **Un fallo en las conexiones puede provocar un caos, pues en España no se han planteado soluciones de este calado en coexistencia de tecnologías.**

Como se puede observar dada la evolución del GPON y del despliegue de los distintos operadores, el coste y la complejidad de instalar toda la infraestructura se va amortizando con lo existente y se permite inyectar sobre la misma, nuevas tecnologías que busquen un beneficio para el cliente y una mayor capacidad para dar servicios a los operadores. Incluso hay quien ya lo ve como el presente, independientemente del coste asociado por ahora, como así lo demuestra el anuncio [34] de la empresa *Calix* que junto con *Fibrant* han dotado de una red PON a la entidad académica *Cattawba*

College en Salisbury y cuyos planes de llevar XGS-PON y próximamente NG-PON2 explica *John Colvin*, vicepresidente de Calix para la cartera de Norte América. De esta forma, la llegada del XGS-PON previo paso al NGPON2 está garantizada y daría tiempo, con un despliegue controlado a tener costes equiparables a los actuales para conectar a un cliente de FTTH con GPON en el mercado español.

No se han encontrado públicamente equipos ni ofertas comerciales para la tecnología XGS-PON de los suministradores de GPON del mercado español que en la actualidad son ZTE [35], Huawei [36] y Alcatel-Lucent [37] (Nokia), pero tomando en consideración la Tabla 14 de equipamiento y de precios que el mercado estima y las menciones encontradas en las páginas web de los fabricantes, se obtiene la siguiente tabla de posibles disponibilidades de equipos XGS-PON (cabe destacar que de la siguiente tabla, el término *Tarjeta PON* se refiere a aquella tarjeta con posibilidad para conectar módulos ópticos XFP de la tecnología XGS-PON):

XGS-PON	FABRICANTES		
	HUAWEI	ZTE	NOKIA
<i>OLT</i>	MA5800	ZXA10 C300	7360 ISAM FX
<i>Tarjeta PON</i>	TWED	comercial 2016?	FWLT-A
<i>XFP</i>	No encontrado modelo	No encontrado modelo	No encontrado modelo
<i>ONT residencial</i>	solucion con router integrado comercial 2017?	prototipo 2016?	Prototipo 2016 = TW-240GX-A comercial para 2017?
<i>ONT empresa (ONU)</i>	MA5821 --> disponible comercial 2017?	prototipo 2016? comercial 2017?	Prototipo 2016 = TW-240GX-A comercial 2017??
<i>CEx</i>	No encontrado modelo	No encontrado modelo	No encontrado modelo

Tabla 17 Disponibilidad equipamiento XGS-PON suministradores en España

No obstante, únicamente a nivel mundial las menciones directas sobre XGS-PON han sido sobre la empresa **Adtran** (*Kurt Raaflaub* aboga por el despliegue inmediato de este tipo de sistema PON para dar servicio a empresas, residencial y backhaul móvil de manera eficiente y con mucho menos coste que con el NG-PON2 actualmente [38]) y el despliegue de **Fibrant** anterior junto con Calix. Incluso desde esta última empresa se atreven a dar fecha a equipos comerciales como aparece en la tabla anterior. El director de Marketing de Calix, *Greg Bathrick* ha sido nombrado recientemente director del área de trabajo en Redes de Acceso con Fibra para el Broadband Forum como publica su empresa [39], y en esa publicación advierte que los equipos comerciales estarán ya disponibles para despliegue masivo en 2017 haciendo posible que las nuevas generaciones de los sistemas de PON, de nuevo aparezcan para dar soporte a soluciones de backhaul móvil y a otros servicios donde el punto culminante se encontrará en el momento que los costes de NG-PON2 se reduzcan y por ello se empiece también a desplegar de forma masiva. Sin embargo, antes aparecerá el XGS-PON.

Pero por ahora, esta tecnología se aplicará en forma de experiencias pilotos como los que próximamente aparecerán en España que serán con los tres fabricantes antes mencionados que tienen despliegue y contratos en nuestro país, como así ha ocurrido con Nokia y Telefónica que mantiene una experiencia piloto estable desde febrero de 2016. Cuya prueba de velocidad con una conexión de Triple Play con TV de Alta Definición (HD), VoIP y velocidad simétrica de 1 Gbps obtuvo el siguiente resultado mediante test de velocidad con equipamiento normal de cliente residencial menos la ONT que fue de empresas.



Figura 78 Test de velocidad con SpeedTest.net con XGS-PON

Además, no sólo de equipamiento para despliegue de servicios se nutre el mercado de las telecomunicaciones en los sistemas PON. Fabricantes de equipos de medidas y diagnóstico como *Tracespan* [40] están vendiendo a operadores y fabricantes de equipos XGS-PON y NG-PON2 de todo el mundo, analizadores de tráfico y de mensajes de control entre OLTs y ONTs.



Figura 79 Equipo NG-PON Xpert de Tracespan compatible con XGS-PON y NG-PON2

Esto permite resaltar aún más que el mercado está en movimiento y los operadores quieren tener a su disposición todos los equipos que les permitan operar de la forma más eficiente posible con estas nuevas tecnologías de los sistemas PON para responder a las necesidades que ya se plantean y que seguro los operadores estarán dispuestos a asumir si se tienen en cuenta los últimos informes del sector de las telecomunicaciones en España [41] en los que se da cuenta de un aumento en los ingresos debidos al incremento de los acceso en fibra y a los servicios que van sobre ella como la televisión de pago con contenidos en HD y bajo demanda que exigirán en poco tiempo también un aumento de las capacidades en términos de anchos de banda para los sistemas PON.

Capítulo 4. La solución de futuro: NG-PON2

4.1 ¿Qué es el NG-PON2 y qué soluciones aporta?

El estándar que marca el verdadero y prometedor futuro de los Sistemas PON es el G.989 y su serie [21] que marca las características básicas, escenarios y configuraciones del 40 GPON como también se le conoce al NG-PON2. Esta tecnología supone un paso de gigante en términos de anchos de banda y de concepción de las Redes de Acceso con Sistemas PON ya que permite trabajar con multiplexaciones de distintas longitudes de onda, separadas por rango para sentido de la comunicación y con la posibilidad de que cualquier ONT se sincronice con una de ese rango. De esta forma se permite reconocer a usuarios desde el punto de vista físico, algo que no hacía el GPON ni el XGS-PON donde todas las ONTs trabajan a una misma longitud de onda de downstream y otra de upstream.

Esta capacidad de ancho de banda de 40 Gbps gracias a usar 4 lambdas (al menos) que llegarían a los clientes donde cada una llevará 10 Gbps simétricos para un splitting variado como se explicará más adelante, junto con la capacidad del equipo de sincronizar ONTs en cualquiera de ellas, haciendo de éstas que sean “colorless” explican la motivación de los organismos internacionales, fabricantes y operadores de que saliera estandarizada una tecnología así. Sin embargo, fueron muchos los “quebraderos de cabeza” que se dieron desde el año 2010 hasta la actualidad para dejar claro cómo se gestionaría este salto tecnológico. De 2010 a 2012 las distintas reuniones del FSN (*Full Service Access Network Group*) como organismo para gestionar el estándar del NG-PON2 fueron objeto de debate para el uso de las longitudes de onda de trabajo, las pérdidas y las distancias soportadas y los posibles efectos de usar de 4 a 8 longitudes de onda (incluso más) como el *efecto Raman* [39]. Lo que estaba claro era que en un primer momento se iba a trabajar con 40 Gbps como indicaba la serie G.989. Una vez se llegaron a determinar dichos puntos de conflicto en el FSN, lo siguiente, tal y como explican *Yuanqiu Luo* y *Frank Effenberger* en un artículo publicado en enero de 2013 en la web del fabricante de equipos Huawei [43] fue seleccionar qué tipo de sistema haría posible que se trabajara sobre una misma ODN de las ya desplegadas con hasta 40 Gbps de tráfico. De esta forma surgieron las distintas propuestas:

- **XGL-PON** → Primera propuesta basada en una evolución del downstream del XG-PON1 hacia 40 Gbps en una sola longitud de onda, mientras que el upstream se quedaría en 10 Gbps y con acceso por TDMA [44]. Para comparar, el actual NG-PON2 es un sistema de 40 Gbps simétricos sobre 4 lambdas (evolucionable a más).

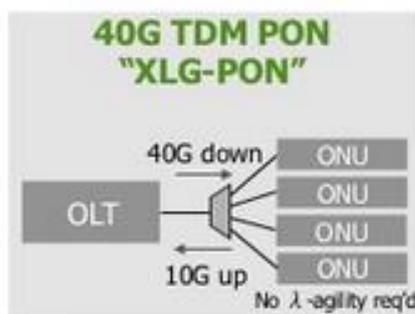


Figura 80 Propuesta XLG-PON

- La segunda de las propuestas fue un **TWDM-PON** [44] pero con el entramado y la operativa de XG-PON1, sobre distintas lambdas y hasta un máximo de cuatro, para poder trabajar con **40Gbps en downstream en total y con 10 Gbps para el upstream**. Cada lambda llevaría un upstream de 2.5 Gbps. Posteriormente se evolucionaría a 10 Gpbs simétricos.

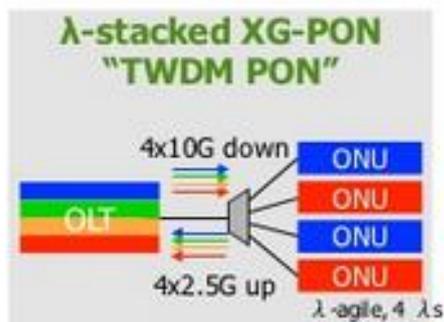


Figura 81 Propuesta TWDM-PON con empleo de cuatro lambdas de XG-PON1

- La tercera propuesta fue un **WDM-PON rígido** [44] de 5 rangos de 8 longitudes de onda cada uno, para hacer que cada lambda llevara 1 Gbps, haciendo un total de 40 lambdas igual a 40 Gbps. Esta opción era muy rígida, poco escalable, muy sensible a las pérdidas y cuyos filtros WDM debían ser perfectos y no desviarse en absoluto para no filtrar longitudes no deseadas. Era el WDM-PON más duro, prácticamente una lambda por cliente.

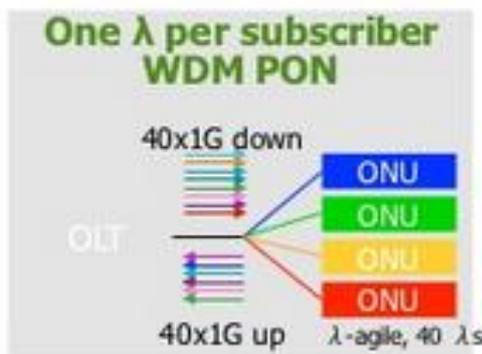


Figura 82 Propuesta WDM-PON con empleo de 40 lambdas de 1 Gbps. Lambda / cliente

- La última de las propuestas antes de la decisión final del FSAN fue emplear tres tipos de multiplexación por división de frecuencias ortogonales que aplicado a una modulación QAM y la transformada de Fourier (FFT) se podían generar señales digitales OFDM, algo parecido a lo que se emplea para LTE. Esto se conocía como **OFDM-WDM** [43].

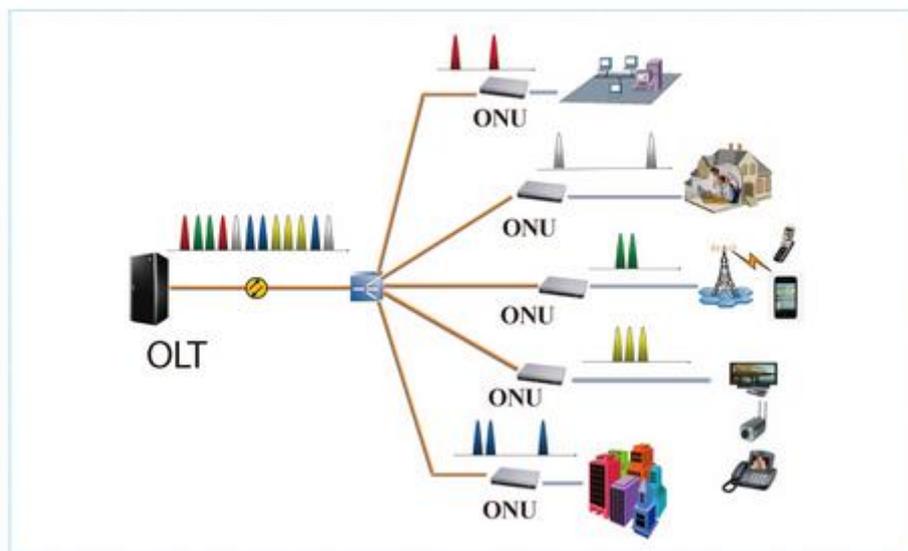


Figura 83 Propuesta OFDM-PON. Señal OFDM para cada cliente. Esquema propuesto por ZTE

Finalmente los miembros del FSAN, a pesar de luchar cada uno por distintas opciones ya que el que saliera una propuesta u otro beneficiaría al suministrador que propuso la idea y la tecnología, asumieron el objetivo común de encontrar una “mix” de soluciones que fuera capaz de aportar un balance óptico, un consumo de potencia y alimentación, una tecnología que permitiera la convivencia con otras tecnologías legacy sobre la misma ODN asumibles, y la posibilidad final de que los componentes, tarjetas y ONUs pudieran ser susceptibles de una evolución a futuro. Todo ello condujo al TWDM-PON que será objeto de estudio y que responde al empleo de 4 longitudes de onda en cada

sentido de transmisión, separados y multiplexados mediante WDM en las cuales se pueden trabajar con 10 Gbps simétricos (mejora respecto al TWDM-PON inicial), para poder hacer un total de 40 Gbps y donde, además, se puedan provisionar y sintonizar hasta 256 ONUs posibles en cada una según las distancias y los balances ópticos.

Dichas longitudes de onda aparecen expuestas en el estándar G.989.2 [45] con distintas opciones para el upstream en cuanto a las bandas de trabajo.

Wavelength compatible systems	TWDM PON		PtP WDM PON
	Downstream	Upstream	Upstream/downstream
GPON, RF video, XG-PON1	1596-1603 nm	Wideband option 1524-1544 nm Reduced band option 1528-1540 nm Narrow band option 1532-1540 nm	Expanded spectrum 1524-1625 nm (Note 1) Shared spectrum 1603-1625 nm (Note 2)

Tabla 18 Longitudes de onda para NG-PON2 y compatibilidad con tecnologías

Los rangos de trabajo con los que se ha trabajado en la demo con esta tecnología y cuyos resultados se exponen en el apartado 4.3, determinan que son los pertenecientes a *Narrow Band* para el upstream. La rejilla de longitudes de onda para el downstream se describe en la tabla 11-2 que aparece en el estándar G.989.2 [45]. Las cuatro primeras longitudes de onda serán a las que se haga referencia para explicar los distintos escenarios de trabajo propuestos para ONTs que estén trabajando en las distintas lambdas posibles.

Channel	Central frequency (THz)	Wavelength (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

Tabla 19 Longitudes de onda para NG-PON2 downstream según Tabla 11-2 del G.989.2

De igual forma, aunque más adelante en el estándar, aparece una rejilla de lambdas para el upstream que se indica a continuación y que se asociarán con los canales de downstream para determinar la pareja final de lambdas (una de downstream y otra de

upstream) con las que se trabajará en un despliegue que emplee esta tecnología de NG-PON2.

Table VIII.5 – TWDM PON upstream channel grid example

Channel	50 GHz CS		100 GHz CS		200 GHz CS	
	Frequency (THz)	Wavelength (nm)	Frequency (THz)	Wavelength (nm)	Frequency (THz)	Wavelength (nm)
1	195.25	1535.43	195.6	1532.68	196.1	1528.77
2	195.20	1535.82	195.5	1533.47	195.9	1530.33
3	195.15	1536.22	195.4	1534.25	195.7	1531.90
4	195.10	1536.61	195.3	1535.04	195.5	1533.47
5	195.05	1537.00	195.2	1535.82	195.3	1535.04
6	195.00	1537.40	195.1	1536.61	195.1	1536.61
7	194.95	1537.79	195.0	1537.40	194.9	1538.19
8	194.90	1538.19	194.9	1538.19	194.7	1538.77

Tabla 20 Rejilla de lambdas para upstream en NG-PON2 según estándar G.989.2

De acuerdo a la anterior tabla, aparecen distintos valores de lambdas (y de frecuencia) dependiendo del *Channel Spacing* (CS) que más adelante se explicará en detalle. Para el estudio realizado en la demo de la tecnología NG-PON2 se observa una rejilla similar al expuesto para el valor de 100 GHz de CS, por tanto, se puede determinar que las soluciones precomerciales probadas apuestan por estos valores que serán muy importantes de cara a un despliegue. El valor de la columna *Channel* no es baladí ya que indica que la lambda downstream de 1596.34 nm como valor nominal correspondiente al *Channel* 1 con el que transmitirá un puerto PON (láser XFP), deberá escuchar los mensajes provenientes de las ONTs sintonizadas para esa lambda downstream, al valor de 1532.68 nm aproximadamente para la lambda de upstream. Así ocurrirá sucesivamente para los demás canales de tal forma que la solución planteada por ahora para un despliegue comercial a futuro sería el mostrado en la siguiente figura.

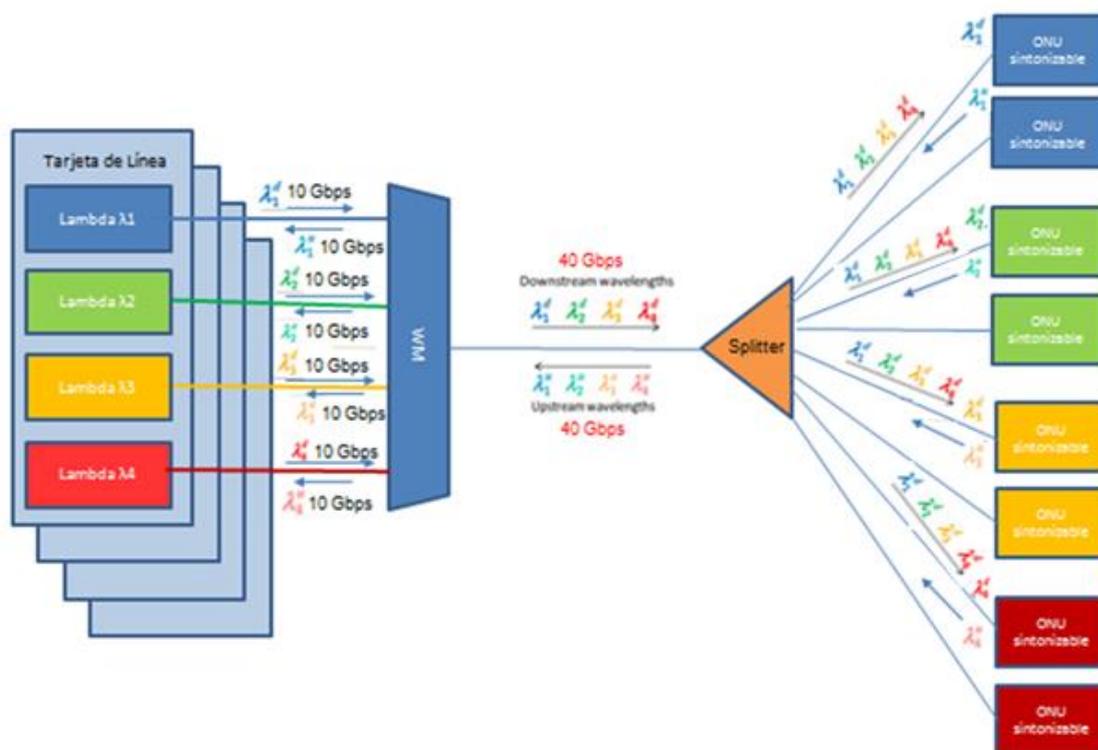


Figura 84 Propuesta básica de lambdas para TWDM-PON simétrico

Tras esta elección el siguiente punto de conflicto fue la elección del rango de longitudes de onda entre las bandas C y L que comprenden de 1530 a 1560 nm y 1560 a 1620 nm. Había que tener en cuenta que si se quería coexistencia con GPON y con XG-PON1, en ese momento, las bandas elegidas debían tener suficiente espacio para que los filtros y los amplificadores de los equipos ópticos fuesen capaces de trabajar de forma eficiente. De esta forma, se consiguió que finalmente las longitudes para upstream estuvieran entre la banda C y la S donde trabaja el GPON lo que aseguraba poder usar los amplificadores y preamplificadores EDFA (*Erbium-Doped Fiber Amplifiers*) que según el artículo antes indicado [43] sería un interesante campo de trabajo pues se podría trabajar con balances ópticos de pérdidas de hasta 33 dB.

Durante este tiempo de discusión se incluyeron los nuevos componentes optoelectrónicos que harían posible que las ONTs y las OLTs pudieran sintonizarse a distintas longitudes de onda, pues aspectos de OMCI, métodos de control y gestión y capas de servicios se propusieron los mismos que ya se describían en los estándares de G.987 y G.988. Las distintas opciones que se barajaron para la sintonización de los equipos y que cada proveedor entiende como confidencial el uso final en sus equipos de algunas de ellas, fueron las siguientes, aunque no es objeto de discusión en el presente Trabajo, sí se considera oportuno dejarlas indicadas [43]:

- Transmisores sintonizables:
 - **Láser DFB (*Distributed FeedBack*) con control de temperatura (TC).** Tecnología ya disponible que tiene unos costes bajos para su fabricación. Modificar la temperatura del láser hace posible emitir en una longitud de onda u otra dentro del rango aportado en la Tabla 19. Ya que este tipo de láser se usaría para rangos de longitudes de onda cortos, mientras que un Fabry-Perot, por ejemplo, se emplearía para rangos mayores, pero no es tan eficiente como el láser DFB para esta tecnología de NG-PON2. La forma de operar con ella no ha sido informada y es confidencial para los operadores.
 - **Láser DFB con control de temperatura parcial.** Concepto introducido en el FSN para reducir costes sobre los anteriores donde se emplearía un array de láseres DFB junto *electro-absorption (EA) modulators* [46] que son dispositivos semiconductores que podrían modular la intensidad del láser. Previsión de disponibilidad en 2014, pero no se tiene constancia de su uso en la demo de los equipos que se pasará a explicar en el apartado 4.3 del presente Trabajo. Tampoco se considera oportuno entrar más en detalle debido a la falta de información y a la temática del presente Trabajo.
 - **Láseres Multi-sección DFB sin enfriamiento.** Una opción interesante para trabajar con varios láseres de forma simultánea con costes más altos que con el control de temperatura para las tasas de 10 Gbps simétricas, y con problemas de fabricación por el espacio reducido del módulo XFP a conectar en los puertos PON de la OLT. Como ventaja podría indicarse que el rango de operación para los láseres sería mayor y no habría tanta limitación o exigencia en cuanto a la sintonía, sin embargo, las rejillas de frecuencias o de lambdas de trabajo están ya anunciadas y publicadas como se ha indicado anteriormente.
 - **ECL (*External Cavity Laser*) con control mecánico sin enfriamiento.** En el momento de la edición del artículo se suponía su disponibilidad para 2015 pero los costes y los problemas de estabilidad de los láseres no lo hacían factible para esas fechas.
 - **ECL con control “*thermo/electro/piezo/magneto-óptic*”** sin enfriamiento. Hace referencia a un “placeholder” para contener varios ECL. Fechas parecidas a las de un único ECL.
- Receptores sintonizables [43]:
 - **Filtro Fabry-Perot sintonizable térmicamente.** Disponible actualmente y quizás usado en suministradores que hayan apostado por la gestión térmica de los láseres. Es un receptor de bajas pérdidas que se sintoniza en función de un control de temperatura [46].

- **Filtro FP sintonizable mediante variación de ángulo** → Según el artículo tienen el problema de su fabricación en serie y su solución podría haber llegado en 2013. Permite obtener un ancho de banda optimizado para sistemas multicanal para poder recibir uno de ellos [48].
- **Resonador en anillo de sílice sintonizable por corriente** → Potencialmente eficiente para integrarse en detectores que permitirían trabajar con modulaciones NRZ con anchos de banda de hasta 40 Gbps [49].
- **Filtro sintonizable de cristal líquido**: experimental, basado en principios de los filtros Lyot empleados para usos de astronomía solar, que permitiría filtrar longitudes de onda como los anteriores [50].

Respecto al uso de una u otra tecnología, en opinión de *Luo y Effenberger* [43] se informa del prototipo empleado en China entre Huawei y China Telecom, donde el transmisor láser empleado fue el primero de los mencionados y el receptor óptico de la ONU fue finalmente un fotodiodo de avalancha *APD ROSA (Receiver Optical Sub-Assembly)* usado comúnmente en aplicaciones WDM. Mediante control lógico por software, a la ONU se le podía solicitar una sintonización en una λ u otra y una emisión.

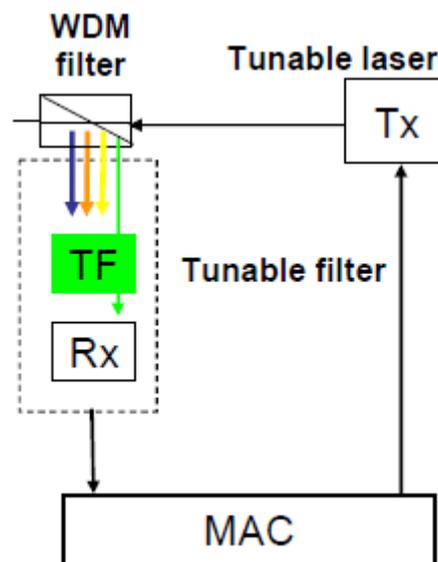


Figura 85 Esquema conceptual de bloques de una ONU de NGPON2

Finalmente, tras exponer los problemas y las opciones a las que tuvieron que hacer frente los actores involucrados en el estándar, las soluciones elegidas para la serie G.989 serían dos comerciales: la TWDM-PON y la PtP-WDM que se explicarán en el siguiente apartado. Aunque por lo que se ha podido comprobar y probar en versiones

de demostración precomerciales, los suministradores que trabajan en el mercado español han elegido el TWDM-PON. Pero, en cualquier caso, sea una u otra, la solución que aporta esta tecnología del NG-PON2 y que servirá para apoyar los usos comerciales del Apartado 4.4 reside en su capacidad de uso. Sin describir los costes que son demasiado altos por ahora para implantar esta tecnología, de ahí que en el anterior capítulo se haya apostado por ahora por el XGS-PON, el NG-PON2 aportará los siguientes avances:

- En los primeros prototipos comerciales e incluso en el estándar G.989 se describe la solución de 4 longitudes de onda en cada sentido de transmisión.
- En cada longitud de onda se podría dar de alta ONTs que pertenezcan a distintos servicios de esta forma se podría dar el siguiente escenario que enunció en su página web *Alcatel-Lucent* [51].

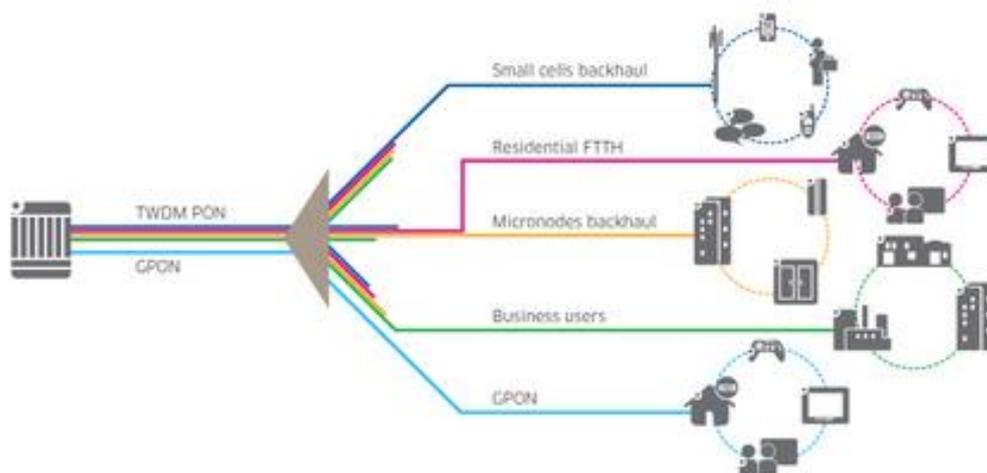


Figura 86 Escenario servicios sobre TWDM-PON + GPON en Alcatel-Lucent

Tanto NG-PON2 como las otras tecnologías mencionadas deben ser compatibles con las recomendaciones y protocolos necesarios para poder dar esos servicios. Una visión conceptual de cómo se integran esos servicios sobre los Sistemas PON sería la siguiente:

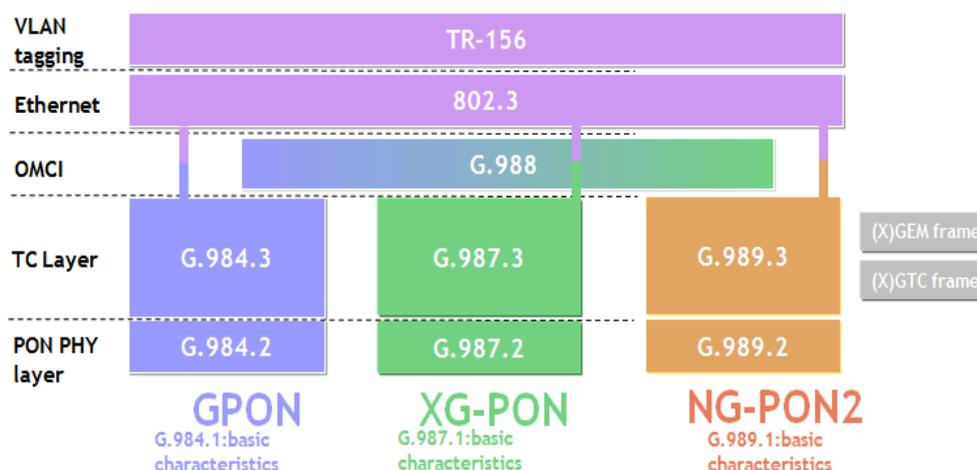


Figura 87 Pila de protocolos sobre Sistemas PON para provisión de servicios

- Al separar por longitudes de onda distintos grupos, puedes dar a cada grupo servicios con anchos de banda simétricos de 10 Gbps.
- Una misma ODN puede dar conectividad a una o varias OLTs ya que se aconseja la capacidad de migración de ODN y de convivencia. El NG-PON2 está preparado para llevar las longitudes de onda de XGS-PON (las mismas del XG-PON1) y del GPON, incluso del vídeo RF a 1550 nm (y en última instancia lambdas para OTDR (*Optical Time Domain Reflectometer*) para mantenimiento físico de la fibra óptica).

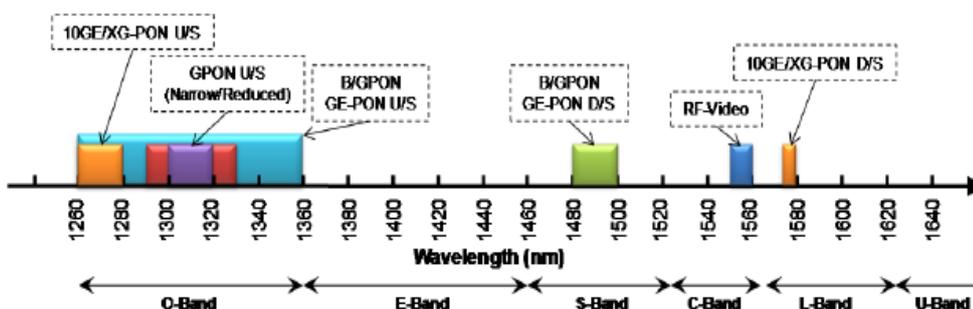


Figura 88 Distribución de longitudes de onda de tecnologías anteriores. Figura 8-2 del estándar G.989.1

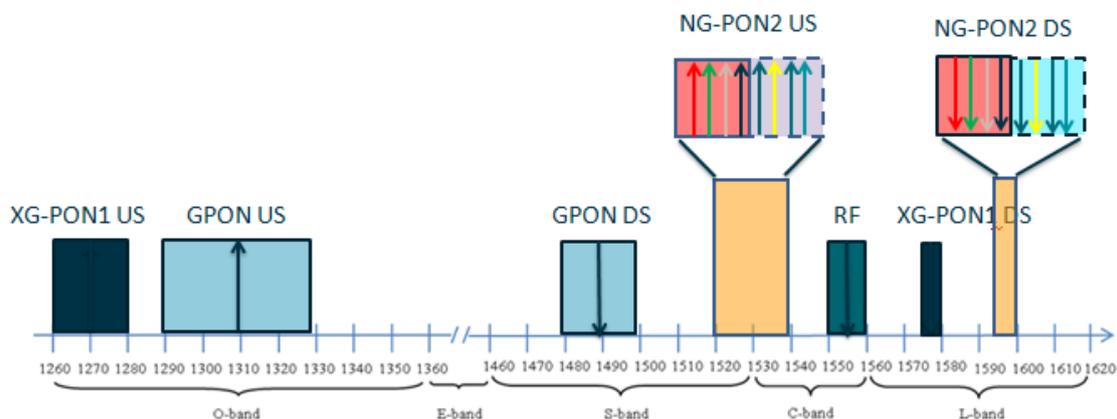


Figura 89 Distribución de longitudes de onda incluidas NGPON2

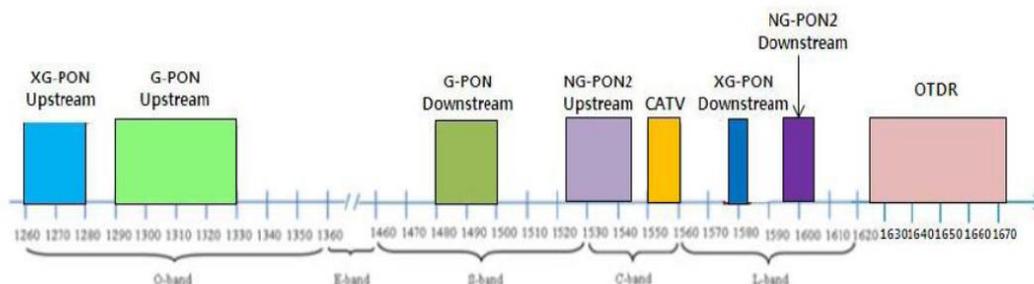


Figura 90 Distribución de longitudes de onda incluidas NG-PON2 y OTDR

- Sólo se necesita establecer la instalación de los distintos componentes como se verá en el siguiente apartado, ya que el NG-PON2 necesita, además de un CEx si se quiere convivencia con otras tecnologías, un de/multiplexor WDM (o WM, se puede nombrar de ambas formas) que puede estar integrado o no dentro de las tarjetas de puertos PON. El WDM es un elemento que introduce pérdidas muy bajas y se basa en unos filtros muy restrictivos para poder seleccionar correctamente las lambdas de los puertos de entrada para la posterior multiplexación en downstream; y para el envío de las lambdas de upstream correctas hacia los puertos PON de forma independiente.

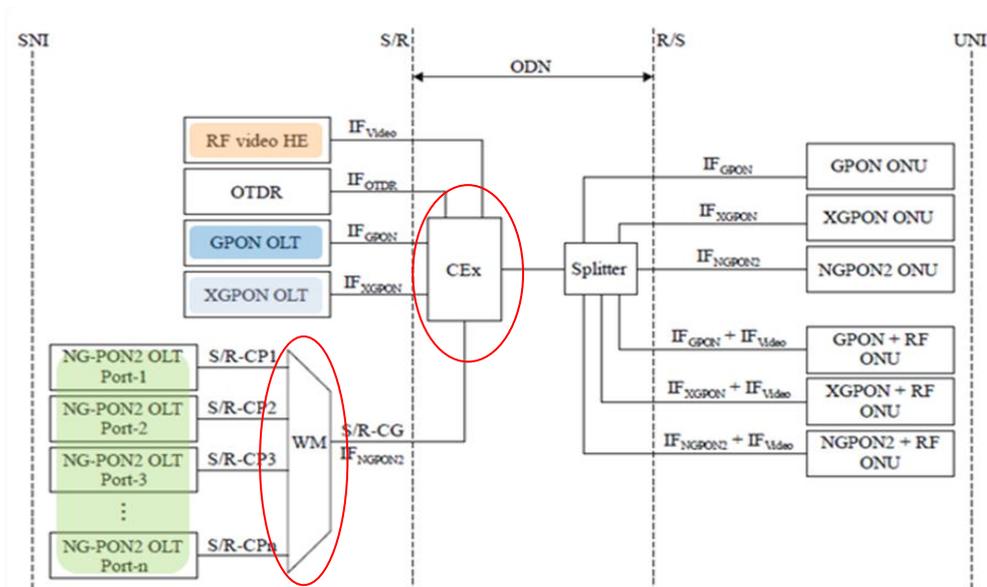


Figura 91 Escenario de tecnologías sobre sistema PON. Figura 5-1 del estándar G.989.1

- La fibra desplegada y las acometidas instaladas permiten usar esta tecnología NG-PON2 sin tener que volver a tender fibra nueva como marca el estándar G.989.1 al describir el uso del estándar G.652 como se describió en el capítulo 2 sobre el GPON. La que se usa en la actualidad es “*new fibre (post 2003)*” como se indica a continuación.

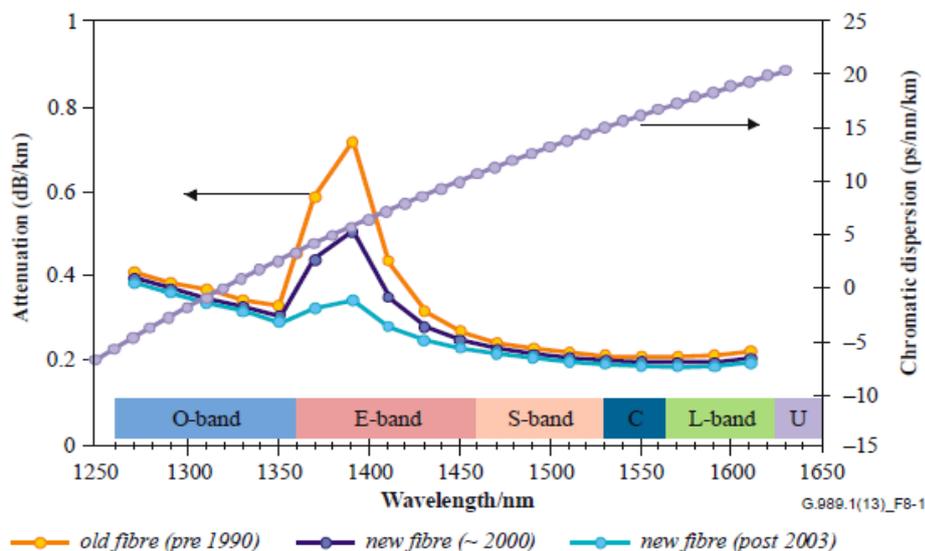


Figura 92 Atenuación en G.652 según longitud de onda. Figura 8-1 del estándar G.989.1

Esta fibra permite una penalización mucho menor en el balance óptico debido a las dispersiones posibles. Sin embargo, este aspecto no es algo que se deba

minusvalorar. Uno de los problemas que se podrían encontrar en sistemas con uso de múltiples lambdas y con tasas de 10 Gbps es la penalización por la dispersión cromática. Su aparición aumentaría la atenuación total haciendo inviable que a distancias de 20 km el NG-PON2 sea estable con splitting de 1:64. Sin embargo, en el estándar se recoge, como se verá más adelante, que la modulación propuesta para estos sistemas es la NRZ o *Non-Return-to-Zero* que permite aportar simplicidad a la solución y soporta las tasas exigidas con múltiples lambdas.

El uso de NRZ podría ser algo a cambiar o mejorar en el futuro para sistemas NG-PON2. *Li Shengping*, Ingeniero de Redes de Acceso para Huawei [52], indicó que usar modulación NRZ para futuras evoluciones en cuanto a mayores tasas de tráfico en cada lambda, por ejemplo 25 Gbps, era inviable debido a la penalización que tendría debido a la dispersión para las bandas C y L, y que por tanto para paliar esa atenuación provocada era necesario introducir estructuras DSP (*Procesado digital de señales*) que para 25 Gbps resultarían extremadamente costosas. De esa forma se advertía que para el futuro no había que descartar el uso de otras modulaciones como la duobinaria que sin entrar en detalles genera tres niveles de modulación que la hacen más robusta que NRZ, ó PAM-4 que combina dos bits en un baudio, aumenta cuatro veces la tolerancia respecto a NRZ.

Idéntico concepto aporta *J.J. Vega Olmos* y sus compañeros del Departamento de Electrónica de la Universidad de Dinamarca [53] que abogan por el uso de una modulación polibinaria de hasta 5 niveles para mejorar la eficiencia y reducir la penalización por fenómenos de dispersión empleando tasas ultrarrápidas de más de 40 Gbps por lambda. Sin duda conceptos que abren una vía de estudio y que a día de hoy puede que no sean viables por el enorme coste que supone implantar soluciones de NG-PON2 como posteriormente se verá, pero que en un futuro podrían deparar la posibilidad de llevar NG-PON2 a más distancia y con mejores balances de potencia totales.

- El trabajar con estos anchos de banda entre OLT y ONT hace necesario una evolución en la capacidad de tráfico de la OLT haciendo equipos más potentes y que deban ser más robustos asegurando de esta forma la evolución de los equipos. Se aconseja en este punto que dicha evolución se soporte sobre chasis ya existentes y enrackados en central siguiendo las directrices de los operadores para hacer su despliegue tenga menos impacto económico en ellos.
- No está especificado como tal, pero los fabricantes pueden apostar por varias formas de fabricación y uso del láser de las OLTs, de ahí que luego cada operador pueda adaptar mejor sus requisitos, sus costes y sus tiempos de

disponibilidad para dar los servicios de acuerdo a sus clientes. Desde el presente Trabajo se aboga por una diferenciación de clientes, incluso de servicios para obtener la potencia que aporta esta nueva tecnología. Las distintas variantes en cuanto a la óptica en las OLTs a tener en cuenta por los operadores son:

- **Láser del puerto PON sintonizable a voluntad:** significa que el operador pueda elegir la longitud de onda de salida del puerto PON. Tiene el inconveniente que el multiplexor que se conectaría posteriormente para llevar las 4 o más longitudes de onda es fijo, es decir, que a cada longitud de onda de entrada le correspondería un puerto numerado y sintonizar otra longitud distinta obligaría a cambiar el conexionado de fibra, algo inviable para un despliegue masivo.

Configuración Horizontal. El primer puerto de cada tarjeta de línea para una lambda distinta. Se crece según necesidad

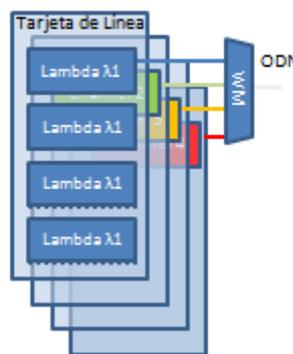


Figura 93 Posible escenario de uso de lambdas en cada tarjeta de línea. Lambda fija o configurable

- **Láser sintonizable, pero en esquema fijo:** significa que, aunque se pueda cambiar la lambda de trabajo, dentro de la planificación de cada operador se ha establecido qué puertos PON funcionarán con una lambda u otra para que el conexionado con el WDM sea fijo y eficiente. Por tanto, la sintonización por comando sería prácticamente inservible, haciendo incluso que la complejidad de la óptica y funcionamiento del puerto PON disminuya, así como su coste.
- **Láser emitiendo en cuatro longitudes de onda a la vez:** sería el caso más ajustado al verdadero TWDM-PON que significa la multiplexación de longitud de onda y en tiempo dentro de un puerto PON. Esto significa que en cada *XFP package* se insertan cuatro láseres (40 Gbps siendo 10 Gbps por cada lambda) que se conectan al WDM y la salida del XFP es ya la salida multiplexada hacia la ODN. Esta solución sería la más potente y a la vez la más cara y compleja pues requiere un gran consumo por láser para poder estabilizar la temperatura y el uso de toda la electrónica que ello conlleva. Pero la ventaja sería que se

elimina un equipo pasivo que obliga a mapear e identificar puertos PON para cada lambda de uso.

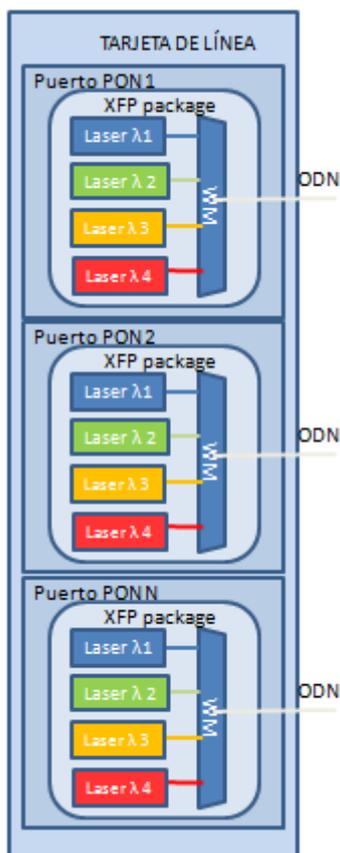


Figura 94 Modelo de tarjeta de línea con un Puerto PON emitiendo en 4 lambdas a la vez

- **Láser de emisión fija (sin posibilidad de sintonización por comando):** la solución más económica sería que cada suministrador vendiera tarjetas de puertos PON donde cada uno emitiera a lambdas fijas, que no sean configurables y se deje todo el trabajo de sintonización a cada ONT. Esta solución permitiría a cada operador una planificación más sencilla pues todos los conexiones serían iguales y la forma de configurar sería fija, sabiendo que según la lambda a la que se mande sincronizar a la ONT, obtengo el puerto PON del que cuelga lo que facilitaría las tareas de mantenimiento. La instalación del XFP se podría dictaminar en orden creciente para las longitudes de onda de trabajo, es decir, la primera del rango de downstream sería la lambda1 y se instalaría en el puerto 1 de cada tarjeta si se emplea una configuración vertical como escenario.

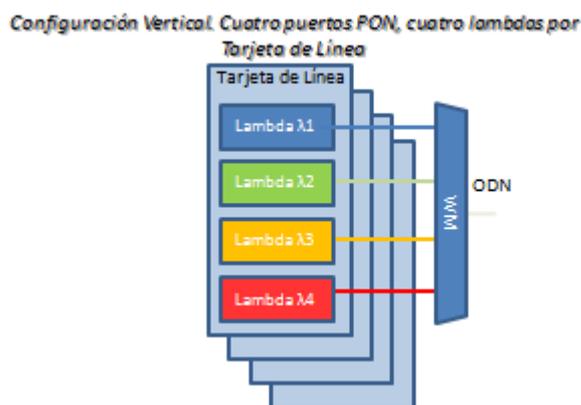


Figura 95 Posible escenario de uso de lambdas por tarjeta de línea. Lambda fija o configurable

Como se puede comprobar hay muchas variantes que aportan las distintas soluciones y cambios comentados respecto a las otras tecnologías de sistemas PON. Sin duda finalmente será el mercado con sus limitaciones de costes y de tiempos y las decisiones de los operadores los que marquen el proceder para la instalación y uso de esta nueva tecnología como es el NG-PON2 y será interesante ver cómo se gestiona el conexionado, configuración, identificación de usuarios con sus servicios y gestión y mantenimiento. Al final de este capítulo se aportarán soluciones al respecto. Sin embargo, tras explicar de una forma resumida qué es el NG-PON2 y lo que aporta, se pasa a explicar de una forma más técnica (como se hizo para el XGS-PON) algunas de sus características que aparecen los estándares publicados por la ITU-T y que la hacen diferente de las demás tecnologías.

4.2 Descripción tecnológica del NG-PON2

Al contrario de lo que sucedía con XGS-PON, el NG-PON2 ya tiene un estándar consolidado y una serie identificada para su evolución y que ya ha sido comentada. La G.989. Esta serie compuesta por tres documentos más uno de configuración y gestión de ONTs que es el G.988 y que vale para las tres tecnologías explicadas en este Trabajo (cuatro si se separa XG-PON1 de XGS-PON como concepto tecnológico). El G.989.1 se publicó en marzo de 2013 [54] y detalla los elementos más generales que se encuentran en la definición de NG-PON2. El G.989.2 publicado en diciembre de 2014 [45] establece la especificación técnica para su capa física, mientras que el último documento que data de octubre de 2015 [55], especifica su capa de convergencia y transmisión. A continuación, se irán mostrando las características más importantes en forma de subapartados de cada una que permitirá entender los aspectos más importantes que un operador debería tener en cuenta para un proceso de homologación y para poder entender un poco más la tecnología. No se pretende explicar el funcionamiento más técnico ni demostrar cómo funciona, pero sí lo más importante para su uso y entendimiento.

4.2.1 Descripción tecnológica de la especificación G.989.1

La especificación citada expone y diferencia los dos sistemas NG-PON2, TWDM-PON y PtP-WDM. La definición expuesta es la siguiente:

- **TWDM-PON** → Multiplexación por división en longitud de onda y por tiempo sobre una red de fibra óptica pasiva. Distintas longitudes comparten el mismo medio físico y las distintas ONUs conectadas a la ODN (sistema punto-multipunto) comparten la longitud de onda sintonizada gracias a la multiplexación por tiempo donde se necesita un sistema de permisos para acceder al medio. Es decir, TDMA para el upstream y TDM para el downstream, algo que ya se usa en el GPON y en el XGS-PON. A priori se trabaja con 4 longitudes de onda en cada sentido de transmisión, pero opcional a futuro se contemplan hasta 8 pares.
- **PtP-WDM** → Multiplexación por división en longitud de onda sobre redes PON pero punto a punto. Es decir, cada cliente, cada ONU, tiene una longitud de onda distinta por tanto no existe ningún algoritmo de acceso al medio como en TWDM-PON. Se estima la posibilidad de que cada ONU sea servida por una o varias lambdas, pero sólo transmitiría en una. Es un sistema complejo y costoso por la cantidad de recursos que se emplean, aunque las ONUs puedan ser sintonizables. En el presente Trabajo como se ha explicado, sólo se trabajará sobre el TWDM-PON, pero la aplicación de PtP-WDM se entiende para servicios de empresas, para el acceso de distintos operadores donde cada uno lleve una o varias longitudes de onda o para acceso móvil llevando cada longitud de onda hacia un nodo B, por ejemplo.

Además, la especificación establece las siguientes características para un sistema NG-PON2 a modo de resumen ya que se han indicado algunas anteriormente, referido para el caso del presente Trabajo sobre TWDM-PON:

- 40 Gbps simétricos para un conjunto de 4 pares de lambdas en un primer momento.
- Distancias de al menos 20 km y con splitting de 1:64. Posibilidad de trabajar sobre splitting de 1:256.
- Los escenarios con ODNs desplegadas donde solo hay tecnología de NG-PON2 se conocen como *Green-Field*.
- Convivencias de distintas tecnologías sobre la misma ODN con distintas longitudes de onda. Se conoce como escenario *Brown-Field*.

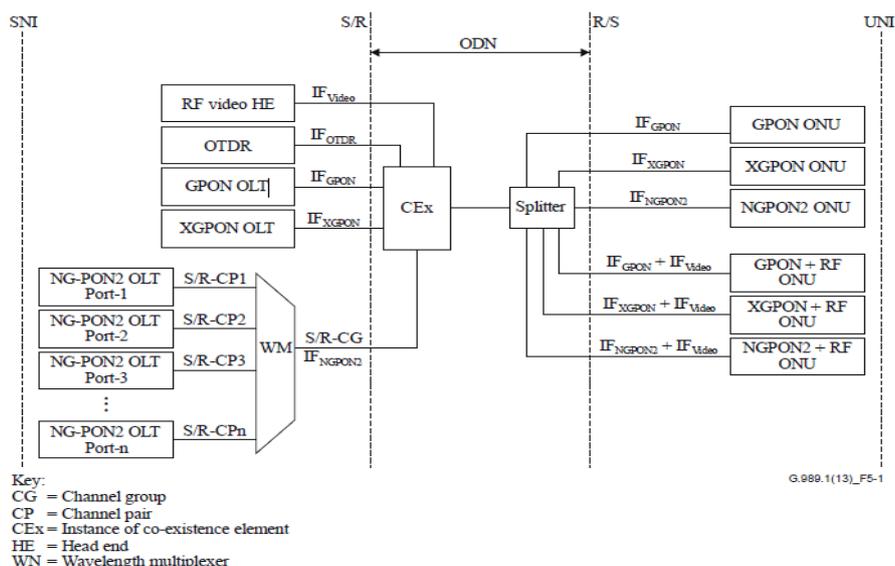


Figura 96 Escenario de convivencia con NG-PON2. Figura 5-1 del G.989.1

- Se aconsejan unas capacidades que hagan posible poder trabajar con estos anchos de banda de 40 Gbps por tarjeta de línea o por puerto PON. En concreto en la tabla 7-2 y en el apartado 8.1 se expone la utilización de puertos de hasta 100 Gbps para las tarjetas de red con respecto a la Red de Agregación y de capacidades de transferencia en el chasis de la OLT de hasta 160 Gbps.
- Para servicios de backhaul móvil se aconsejan emplear anchos de banda de 300 Mbps para LTE y de 1 Gbps para tráficos de LTE advanced.
- Para facilitar la flexibilidad de la solución, se establece el uso de las ONU “colorless” que no requiere la gestión de distintos tipos de ellas pues no estarán sujetas a lambdas fijas como las “coloreadas” en caso de que se usen. Actualmente el coste de la solución de ONU “colorless” es mucho más alto que emplear la lambda fija además de la disponibilidad del equipamiento para esta tecnología NG-PON2 por lo que está solución de lambda fija podría ser factible para soluciones temporales y de urgencia en caso de que algún operador decida introducir en poco tiempo esta evolución de los sistemas PON.
- Para tareas de mantenimiento y de gestión, se deben proporcionar gestión remota, configuración de ONUs, estadísticas de tráfico y de consultas de estado y el uso de OTDR para la gestión de la ODN. Los OTDR emplean longitudes de onda fuera de rango de uso de GPON, XGS-PON o NG-PON2 para que no afecte al servicio de esas tecnologías y permite saber, por ejemplo, donde ha habido una falla o rotura en la fibra óptica.
- El elemento CEx hace posible la convivencia de tecnologías y para ello selecciona rangos de longitudes de onda para poder hacer mux/demux. Debe introducir pocas pérdidas de inserción y además sus potencias reflejadas

deben ser mínimas para que no afecten a los receptores de los equipos del sistema PON.

- El WM no viene detallado en la serie G.989. Los suministradores deberán aportar la documentación y la calibración necesaria para que el mux/demux pueda llevar las lambdas como requiere el estándar. Para las lambdas de upstream no se tiene unos valores determinados de trabajo por el estándar, por ese motivo, el fabricante de NG-PON2 puede aportar un equipo que en el upstream envíe todas las lambdas posibles hacia los puertos PON y estos sean mediante filtrados previos al detector óptico los que seleccionan la longitud de onda de trabajo correcta para el upstream. Esta sería una opción a barajar por los suministradores, pero sería recomendable trabajar con una selección y filtrado de ondas ya en el WM para que a cada puerto PON le llegue su longitud de trabajo. El WM no es un simple divisor óptico como un splitter porque eso introduciría muchas pérdidas (de unos 6 dB para cuatro lambdas que serían cuatro puertos que vendría de $10 \cdot \log(1/4)$, y de 9 dB para 8 lambdas).

NOTA: durante la demo explicada en el apartado 4.3 se probaron dos tipos distintos de WM y de CEx de dos fabricantes distintos considerándose confidencial el diseño y el funcionamiento interno de estos equipos. Para el operador es relevante que para el despliegue se identifique el tamaño y la forma de instalar de estos equipos, así como las lambdas de trabajo en los puertos, pérdidas de inserción, tipos de conectores, pérdidas de retorno y el aislamiento para evitar que se introduzcan lambdas en los puertos pertenecientes a otras tecnologías que estén conviviendo.

4.2.2 Descripción tecnológica de la especificación G.989.2

El estándar G.989.2 define la capa física del NG-PON2 (PMD, *Physical Media Dependent* [45]) y con ello las diferencias con respecto a las otras tecnologías como las longitudes de onda, las topologías de acceso y algunos componentes de las mismas como los splitters, balances ópticos, interfaces, etc. Al igual que con el anterior estándar, se diferencia entre el NG-PON2 con TWDM-PON y el PtP-WDM. En el presente documento sólo se describirá la parte referida a la primera tecnología de ellas.

- En NG-PON2 se establece como aconsejable el uso de equipos que sean sintonizables en la parte del usuario, es decir, ONTs (ONUs) sintonizables de tal forma que aparecen los siguientes términos que tanto en XGS-PON como en GPON no aparecían:
 - o **Granularidad de sintonización** (*tuning granularity*) → mínimos saltos que un dispositivo sintonizable puede dar hasta ajustarse al rango establecido. En la tabla 11-5 se establece un salto de 5 GHz máximo

para sintonizar a 10 Gbps en downstream y para el upstream será un valor de CS/20.

- **CS** o *Channel Spacing* → Diferencia absoluta entre la frecuencia nominal de un rango y las dos longitudes de onda adyacentes. Es decir, el espaciamiento entre las frecuencias o lambdas de trabajo. En el estándar G.989.2 se recogen hasta tres valores: 50, 100 y 200 GHz de separación, sin embargo, en el equipamiento probado en laboratorio se ha trabajado con espaciamiento de 100 GHz tal y como se muestra en la siguiente tabla para el sentido downstream:

Frequency (THz)	Wavelength (nm)	Spacing (GHz)
187.107	1602.248	95.422
187.203	1601.431	95.422
187.298	1600.615	95.422
187.394	1599.800	95.422
187.489	1598.986	95.422
187.585	1598.172	95.422
187.680	1597.360	95.422
187.775	1596.548	

Tabla 21 Frecuencias, lambdas y espaciamiento de trabajo típico para NG-PON2 en downstream

Table VIII.5 – TWDM PON upstream channel grid example

Channel	50 GHz CS		100 GHz CS		200 GHz CS	
	Frequency (THz)	Wavelength (nm)	Frequency (THz)	Wavelength (nm)	Frequency (THz)	Wavelength (nm)
1	195.25	1535.43	195.6	1532.68	196.1	1528.77
2	195.20	1535.82	195.5	1533.47	195.9	1530.33
3	195.15	1536.22	195.4	1534.25	195.7	1531.90
4	195.10	1536.61	195.3	1535.04	195.5	1533.47
5	195.05	1537.00	195.2	1535.82	195.3	1535.04
6	195.00	1537.40	195.1	1536.61	195.1	1536.61
7	194.95	1537.79	195.0	1537.40	194.9	1538.19
8	194.90	1538.19	194.9	1538.19	194.7	1538.77

Tabla 22 Frecuencias, lambdas y espaciamiento de trabajo típico para NG-PON2 en upstream

- **Rango de sintonización** (*tuning range*) → intervalo espectral para una frecuencia central dado por una f_{\max} y f_{\min} o el rango de longitudes de onda/frecuencias donde un dispositivo puede ajustarse para trabajar o sintonizar. Viene relacionado con la calibración de la transmisión. Las

lambdas o frecuencias elegidas para trabajar están estandarizadas como ya se ha mostrado, sin embargo, puede haber una pequeña variación en la frecuencia exacta de sintonización del láser del puerto PON de la OLT que se contempla en este rango.

- **Tiempo de sintonización** (*tunning time*) → es el tiempo invertido desde que un dispositivo sintonizable deja su longitud de onda inicial para sintonizarse a su longitud de onda de trabajo establecida por la OLT, generalmente por comando y gracias a los mensajes enviados entre ambos establecidos en el estándar G.989.3. El valor de este tiempo viene indicado en la tabla 9-2.

Class 1	< 10 μ s
Class 2	10 μ s to 25 ms
Class 3	25 ms to 1 s

Tabla 23 Timeout para sintonización de ONTs. Tabla 9-2 de la G.989.2

- **Ventana de sintonización** (*tuning window*) → diferencia entre la frecuencia o longitud de onda más alta y la más baja del rango establecido para operar con NG-PON2. Establecido en 500 GHz para cuatro lambdas como se puede comprobar en la Tabla 21 que se corresponde a la diferencia entre el límite inferior de la frecuencia más baja de trabajo y el límite superior del espaciamiento de la frecuencia más alta. En la tabla 11-7 del estándar G.989.2 aparece la fórmula para calcular esta ventana de sintonización: $(N+1)*CS$. Siendo CS 100 GHz y N el número de lambdas de trabajo que es cuatro para este caso.
- En la figura siguiente que aparece en el estándar como la figura 5-2 se establece la topología precisa para un escenario *Green-Field* donde sólo existen usuarios de NG-PON2

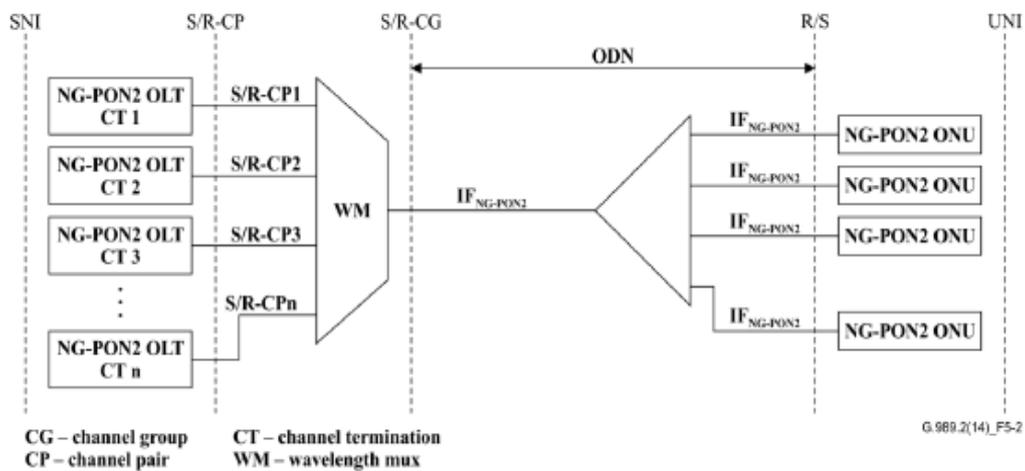


Figura 97 Escenario Green-Field con NG-PON2. Figura 5-2 del G.989.2

El CG o *Channel Group* comprende varias longitudes de onda. Cada pareja de longitudes de onda se denomina *Channel Pair* (CP). Cada *Channel Termination* (CT) es un puerto PON, por tanto, cada puerto PON trabaja en una longitud de onda, es decir, cada CT emite un CP. WM es el de/multiplexador de longitudes de NG-PON2. SNI son las interfaces de conexión con las redes superiores, normalmente la de Agregación. UNI es el puerto o interfaz de conexión con los equipos de cliente como el router de cliente.

- El balance óptico establecido para las pérdidas en la ODN serán las marcadas en la Tabla 6-1 del estándar G.989.2. Se trabajará con la *Class 1* como se explicará en el apartado 4.3 del presente Trabajo. En este balance se incluyen las pérdidas del CEx, no establecidas, pero se informa de que sean las mínimas posibles.

	Class N1	Class N2	Class E1	Class E2
Minimum optical path loss	14 dB	16 dB	18 dB	20 dB
Maximum optical path loss	29 dB	31 dB	33 dB	35 dB
Maximum differential optical path loss	15 dB			

Tabla 24 Balance de pérdidas para la ODN según la clase definida

Al igual que ocurría con XGS-PON en el anterior capítulo, la clase N1 sería la que el estándar recomienda como punto de partida, de tal forma que su integración en despliegues de fibra actuales donde se dimensiona para GPON, estaría dentro del balance óptico recomendado pues para GPON se recuerda que la mínima clase a emplear era B+ con 28 dB de pérdidas en total. La

convivencia de las tecnologías en un despliegue real quedaría así especificando los balances para cada tecnología.

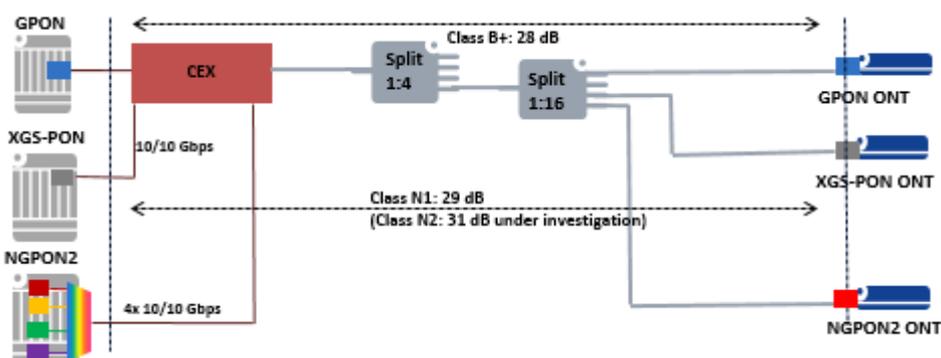


Figura 98 Balance óptico de XGS-PON, NG-PON2 y GPON en un despliegue real

Como se puede comprobar, XGS-PON podría conectarse al CEx desde otra OLT distinta del GPON (también podría venir de otra tarjeta de la misma OLT). Además, se comprueba que el elemento que “cohesiona” las tres tecnologías, el CEx, aparece como elemento de estudio para el balance total de pérdidas. Por tanto, sus pérdidas de inserción deben sumarse al total, no así las del elemento WM que multiplexa hasta 4 longitudes de onda para NG-PON2. Se debe tener en cuenta que la potencia de la señal óptica que sale desde el WM es la potencia de entrada al sistema donde se deben restar las pérdidas acumuladas en toda la red, siendo los máximos como aparecen en la anterior figura de 28 dB como máximo para un correcto funcionamiento del GPON.

- Las distancias máximas entre OLTs y ONUs aparecen en la tabla 6-2 de la G.989.2.

Fibre distance class	Minimum fibre distance (km)	Maximum fibre distance (km)
DD20	0	20
DD40	0	40

Tabla 25 Distancias máximas para NG-PON2 según estándar G.989.2

- Se definen las siguientes características para la sintonización entre emisor y receptor en la cláusula 9.3.7 que permitirá al operador entender parte del proceso que marca la diferencia entre NG-PON2 y el resto de las tecnologías:
 - o En downstream a la ONT se le informa de la longitud de onda a la que debe “escuchar” o recibir el tráfico y la gestión.

- Para transmitir en upstream, la ONT recibe la orden de la longitud de onda a la que debe transmitir para que sea reconocida por la OLT para terminar el proceso de sintonización.
 - La sintonización se puede establecer de dos formas: mediante control del canal o mediante control de la longitud de onda. Su explicación se hará más adelante en detalle cuando se expliquen conceptos como *System_Profile*, *Channel_Profile* o *Burst_Profile*.
- La tolerancia al *cross-talk* debido a las longitudes de onda tan cercanas y a otras tecnologías se deberá establecer en la ONT pues los filtros estarán dentro del equipo, pero para la OLT se aconseja que la separación de las lambdas se haga fuera del equipamiento, en el WM.

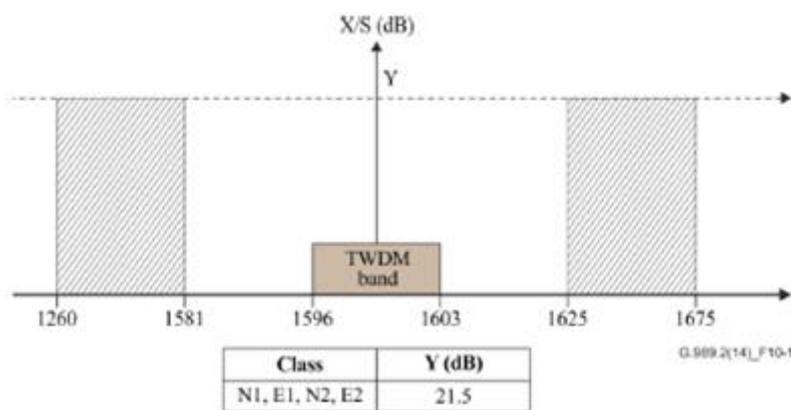


Figura 99 Máscaras para el límite de Cross-talk entre NG-PON2 y otras tecnologías

Donde **S** será la potencia óptica recibida del canal de trabajo de NG-PON2 y **X** será la contribución de las demás potencias recibidas en los filtros de bloqueo de las mismas. La diferencia, que vendría a ser algo parecido a la relación señal a interferencia de un sistema de comunicación, será de 21 dB.

- Los valores máximos nominales de bit rate para NG-PON2 en cada lambda serán los expuestos en la tabla 11-1.

	Nominal line rate, downstream/upstream (Gbit/s)
Basic rate	9.95328/2.48832
Rate option 1	9.95328/9.95328
Rate option 2	2.48832/2.48832

Tabla 26 Máxima velocidad de línea nominal para una longitud de onda en NG-PON2

- La codificación empleada para ambos sentidos del tráfico será “*scrambled NRZ*” donde el nivel alto será un 1 binario y el nivel bajo un 0 binario según la cláusula 11.1.2.
- De acuerdo al Apéndice VI, se establece que pueden aparecer *efectos no lineales de Raman* que provocan un *cross-talk* entre longitudes de onda o señales de distintas tecnologías o una disminución (atenuación) de las tecnologías con longitudes de onda más bajas. El que surja este efecto no lineal es inevitable, pero en el estándar aparecen una serie de procesos que permiten mitigar este efecto y que serán usados por los fabricantes de tal forma que, en el estudio de los distintos factores de pérdidas, aparece siempre un margen de 1 – 2 dB para cada clase de las vistas en la tabla 18. Esa serie de procesos, mitigan el efecto *Raman* que afecta sobre todo en sistemas donde se inyecte también el servicio de vídeo RF en la lambda de 1550 nm, algo que en España no se emplea.

4.2.3 Descripción tecnológica de la especificación G.989.3

En la especificación o estándar G.989.3 [55] se define como la especificación que establece las características de la capa TC o (*Transmission Convergence*). En esta capa se establece el uso de la encriptación AES (*Advanced Encryption Standard*) para los tráficos entre OLT y ONTs, el uso de las técnicas de corrección de errores como el FEC, las asignaciones de ancho de banda para el upstream (técnicas DBA como se vio en anteriores apartados) y sobre todo la forma de sintonizar una ONT con la OLT.

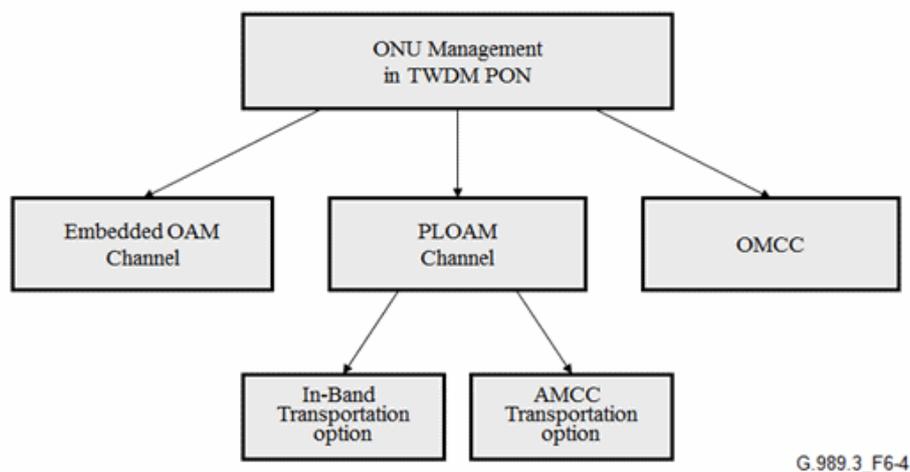
Antes de pasar a explicar algunas de esas características más en detalle que servirán como base para entender muchos de los resultados hallados en la demo planteada en el apartado 4.3, se exponen las diferencias más significativas entre las tramas empleadas para GPON y NG-PON2. Como se puede observar, los bits empleados para los distintos identificadores aumentan, aunque el tiempo de trama es de 125 microsegundos.

	GPON	NG-PON2 (same as XG-PON1)
PHY frame	125 μ s	125 μ s
ONU identifier	8-bits (0..254, 255=unassigned)	10-bits (0..1022, 1023=broadcast)
Alloc-ID (T-CONT id)	12-bits (0..253=default, 254=ONU activation, 255=unassigned, 356-4096=assignable)	14-bits (0..1022 = default, 1023=broadcast, 1024..16383=assignable)
(X)GEM Port ID	12 bits	16-bits (0..1022 = default, 1023..65534=assignable, 65535=idle)

Tabla 27 Diferencias entre las tramas de NG-PON2 y GPON

Respecto a la especificación en sí, se exponen las siguientes características y conceptos que se deben tener en cuenta para un proceso de homologación de esta tecnología y para entender cómo puede funcionar:

- Se definen las siguientes capas o canales de gestión para la comunicación entre ONTs y OLTs.



G.989.3_F6-4

Figura 100 Canales y opciones para la gestión entre ONT y OLT. Figura 6-4 del G.989.3

El sistema de gestión, control y operación se realiza sobre tres canales como se indica en la figura anterior. El **OAM Integrado** gestiona las funciones de las capas PMD y TC (idéntico que en XGS-PON, apartado 3.2) y es clave para las asignaciones de ancho de banda, claves de encriptación, uso de FEC, etc. El OMCC (idéntico al de XGS-PON, apartado 3.2) lleva los mensajes del protocolo OMCI (proporciona la definición de los servicios). El canal PLOAM permite dos opciones para el envío de mensajes de control y gestión: en banda o mediante un canal auxiliar llamado AMCC (*Auxiliary Management and Control Channel*). Este canal auxiliar se puede emplear para la transmisión en upstream del serial number de cada ONT y para las respuestas *Tuning_Response PLOAM* para la sintonización de las ONTs “colorless”.

NG-PON2 tiene otra particularidad en esta especificación. Y es que establece un protocolo para la intercomunicación entre distintos *Channel Termination* o ICTP que se describe en el *Apéndice VI* [55] y que se establece para soportar el uso de múltiples lambdas, más allá de las cuatro definidas de base para la tecnología NG-PON2, pero también se podría emplear para la gestión de posibles handover o aparición de Rogue ONT (aquella que emite de forma continua en upstream sin atender a los permisos concedidos por la OLT y no deja transmitir a otras ONTs haciendo perder la sincronización de éstas).

- El canal PLOAM se diferencia del empleado para XGS-PON en que aparecen unos mensajes que necesitan tanto la OLT como las ONTs para establecer la sincronización, adaptar su potencia, delay y sintonizar a la lambda necesaria. En otras tecnologías con lambdas fijas y únicas para cada sentido, esto no hacía falta, pero esta capa ahora es vital para el correcto funcionamiento de los equipos y un factor a tener en cuenta para una futura interoperabilidad entre suministradores distintos. Las opciones mencionadas para usar esta capa que antes se han enunciado son:
 - o En Banda → los mensajes PLOAM forman parte de la trama XGTC cuando se tengan que enviar. Se emplea sobre todo en downstream. Su uso es obligatorio.
 - o Vía AMCC → se aplica sólo al upstream para mensajes *Serial_Number_ONU* y mensajes de tipo *Tuning_Response* en determinados casos. Como por ejemplo en el descubrimiento de ONTs que no han llegado a ser calibradas y que necesitan de un canal con baja velocidad que interfiera en otras funciones de los canales TWDM. Para que se emplee este canal la OLT debe indicar su disponibilidad en los mensajes *System_Profile*. Tras su uso, si la OLT ha recibido el mensaje por ejemplo de *Serial_Number_ONU* para activar la ONT, se deja de usar este canal. Su uso es, por tanto, opcional.

Los mensajes de la capa PLOAM pueden ser usados por las dos opciones de NG-PON2 existentes, el TWDM o el PtP, y algunos de esos mensajes sólo son válidos para una de las dos, por tanto, el operador debe tener en cuenta en el proceso de homologación qué mensajes se están intercambiando entre ONTs y OLT.

- Se emplea un Identificador de Puerto PON o PON ID → es una estructura de 32 bits que identifica a un puerto PON (*Channel Termination, CT*). Como cada puerto PON, en la especificación, establece que trabaja a una sola lambda, el ID se divide a su vez en dos partes: una de 28 bits que es una etiqueta administrativa del puerto PON o de la OLT (válido para sistemas de gestión) y 4 bits que indican el canal de downstream llamado DWLCH ID (*Downstream WaveLength CHannel ID*). Los distintos DWLCH ID se indican a continuación.

Channel	Frequency (THz)	Wavelength (nm)	DWLCH ID
1	187.8	1596.34	0000
2	187.7	1597.19	0001
3	187.6	1598.04	0010
4	187.5	1598.89	0011
5	187.4	1599.75	0100
6	187.3	1600.60	0101
7	187.2	1601.46	0110
8	187.1	1602.31	0111

Tabla 28 Canales downstream y sus identificadores para NG-PON2. Tabla 6-3 del G.989.3

- Los anchos de banda soportados por un Puerto PON de NG-PON2 (por una lambda de trabajo) son los indicados a continuación:

Downstream line rate (Gbit/s)	Upstream line rate (Gbit/s)
2.48832	2.48832
9.95328	2.48832
9.95328	9.95328
9.95328	9.95328 & 2.48832

Tabla 29 Anchos de banda nominales por lambda en NG-PON2. Tabla 6-1 del G.989.3

- Los anchos de banda soportados por una ONT de NG-PON2

Downstream line rate (Gbit/s)	Upstream line rate (Gbit/s)
2.48832	2.48832
9.95328	2.48832
9.95328	9.95328

Tabla 30 Anchos de banda nominales por ONT en NG-PON2. Tabla 6-2 del G.989.3

- Al igual que para los canales de downstream hay unos identificadores, para el upstream también los hay. Se denominan UWLCH ID (*Upstream WaveLength Channel ID*) y se compone de 4 bits. Este ID es importante para establecer el proceso de sintonización de una ONT que se explicará más adelante.
- La pila de capas y las tramas que conforman una trama de NG-PON2 enviada cada 125 microsegundos responde al siguiente esquema (no difiere de XGS-PON):

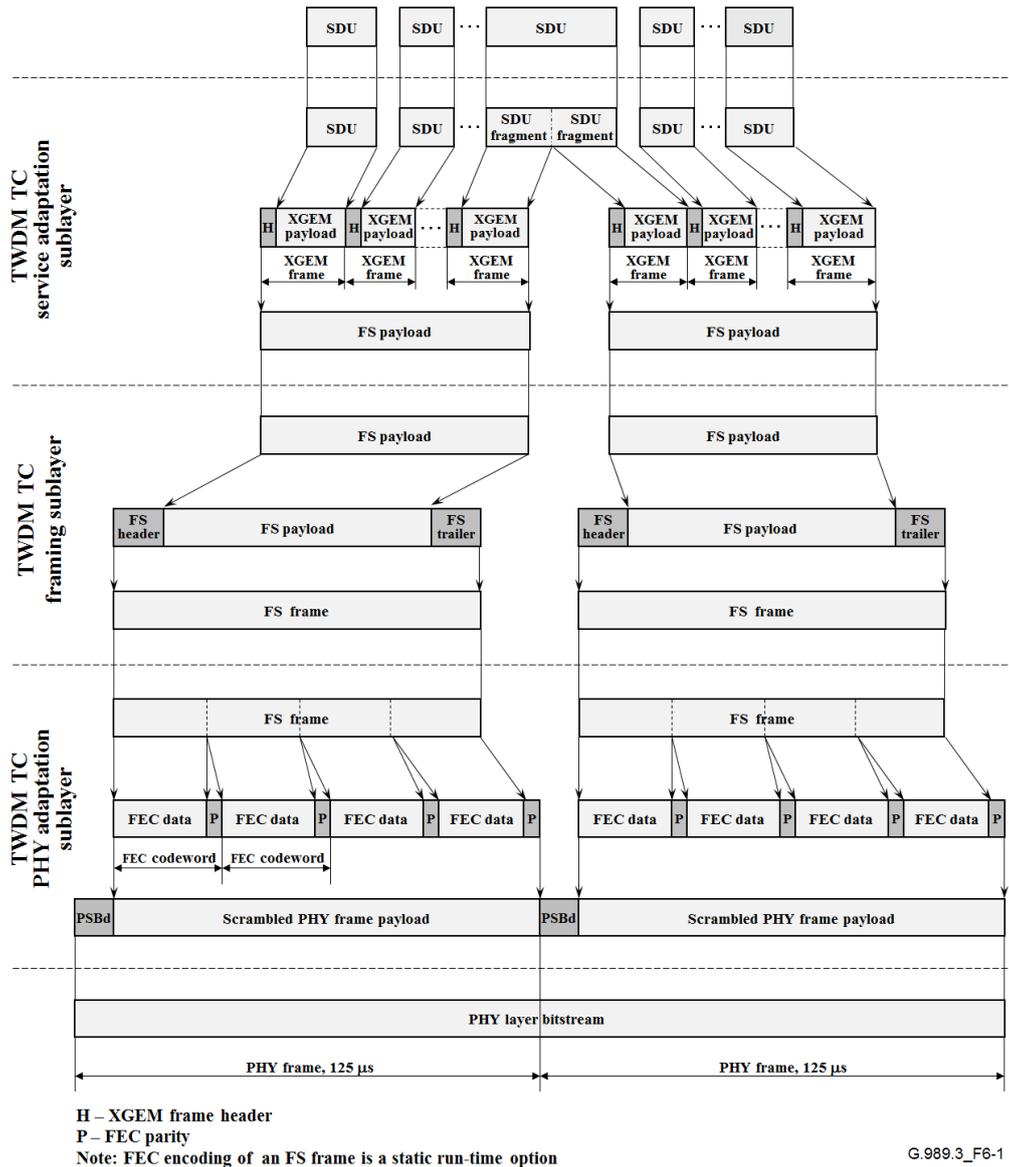
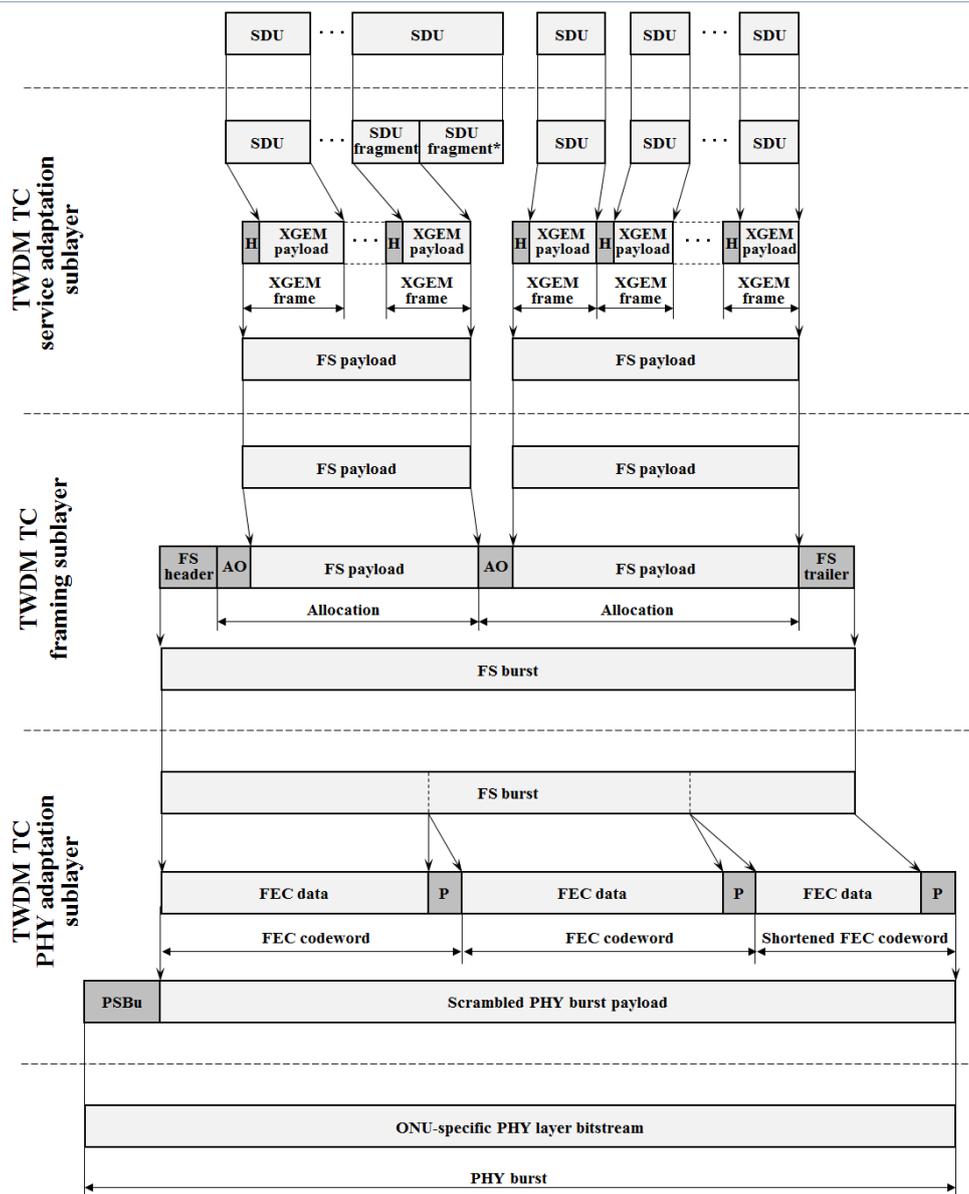


Figura 101 Capas y tramas para NG-PON2 en downstream. Figura 6-1 del G.989.3



(*) The remaining fragment of the SDU is transmitted in the subsequent allocation with the same Alloc-ID.
 H – XGEM frame header
 AO – Allocation overhead
 P – FEC parity

G.989.3_F6-2

Figura 102 Capas y tramas para NG-PON2 en upstream. Figura 6-2 del G.989.3

En las figuras anteriores se definen las tramas con las que se trabaja en NG-PON2. La trama PHY es aquella que dura 125 microsegundos y donde se asientan las cabeceras por FEC, las cabeceras PSB donde irían mensajes como los PLOAM en banda, la FS Frame o trama XGTC como también se le conoce donde iría en su payload las tramas XGEM que se componen a su vez de una cabecera con su identificador (por ejemplo, para indicar un servicio que va hacia una ONT como se explicó en el capítulo 2 sobre el GPON) y un payload donde iría la trama Ethernet. En la cabecera FS va por ejemplo el

campo BWMAP que indica cuándo debe enviar cada ONT tal y como se explicó en el capítulo 2 pues la gestión del DBA es el mismo que en GPON, pero para 10 Gbps en vez de 1.25 Gbps.

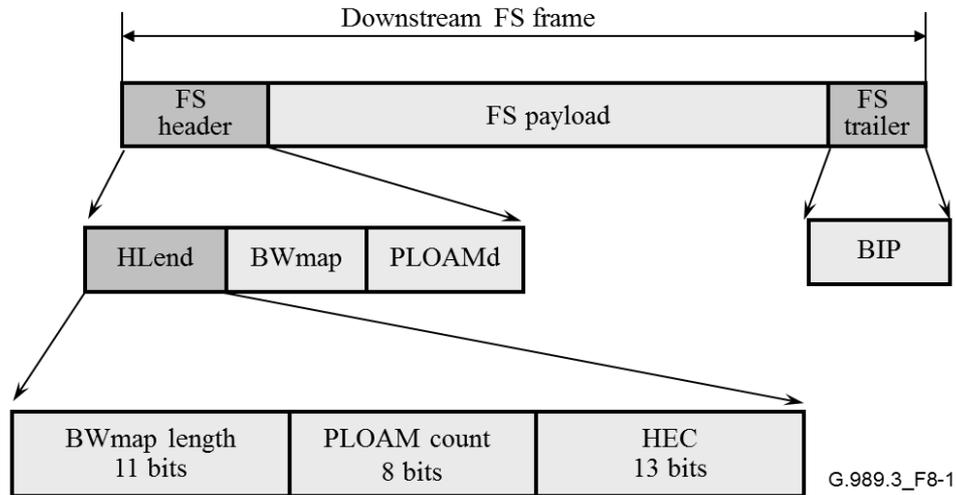
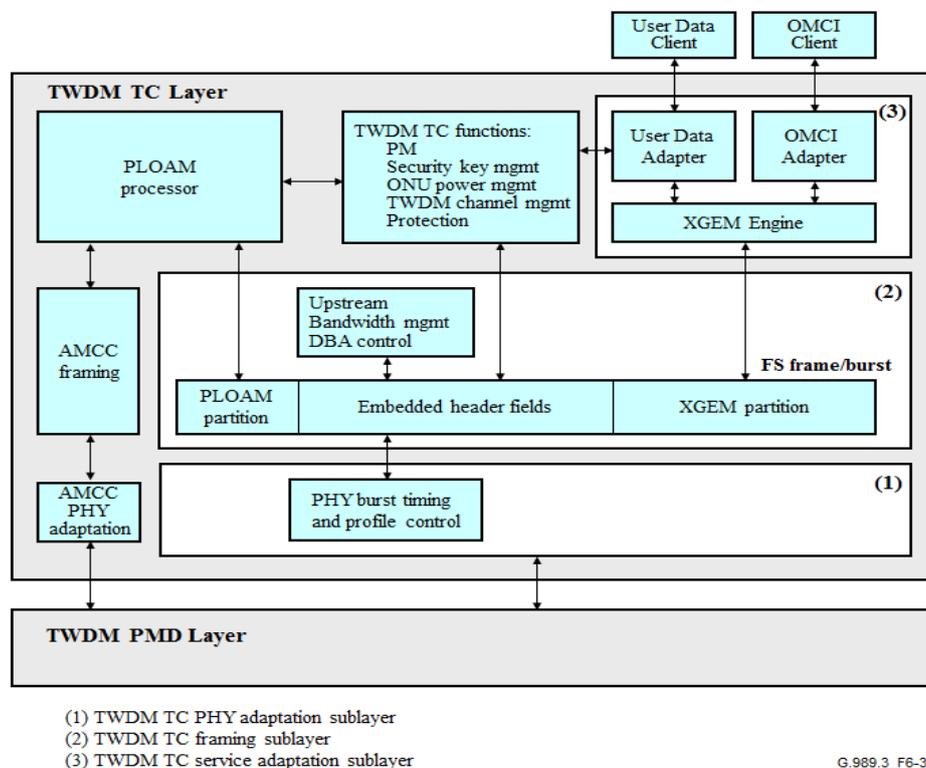


Figura 103 Trama FS para el downstream. Figura 8-1 del G.989.3

- La pila de capas que en general tiene la tecnología NG-PON2 se indica en la siguiente figura:



- (1) TWDM TC PHY adaptation sublayer
- (2) TWDM TC framing sublayer
- (3) TWDM TC service adaptation sublayer

G.989.3_F6-3

Figura 104 Esquema de las capas de funcionamiento NG-PON2. Figura 6-3 de G.989.3

- La gestión del ancho de banda en el upstream se realiza de forma idéntica al XGS-PON y al GPON. Se encuentran las dos formas de DBA ya explicadas y los permisos para enviar son transmitidos por la OLT gracias a los campos BWMAP de las cabeceras de las *FS Frame*. Cada lambda de trabajo tiene su gestión de intervalos de envío en el upstream.

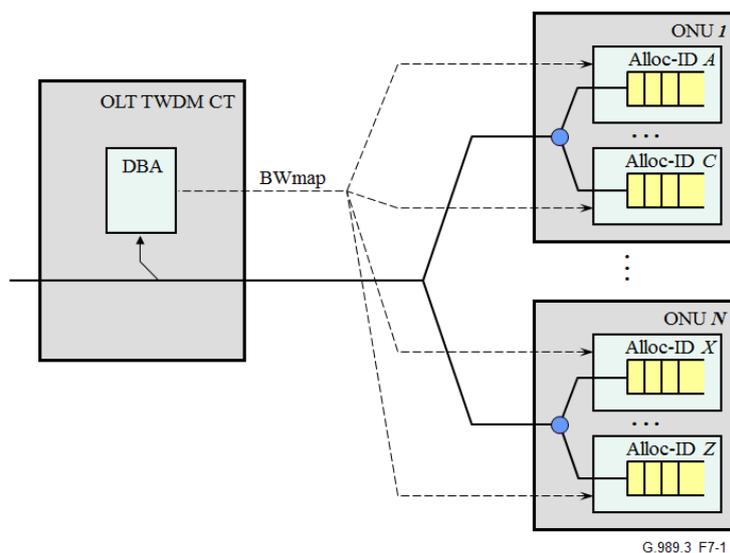


Figura 105 Envío de BWMAP entre OLT y ONTs. Figura 7-1 del G.989.3

- La gestión de los anchos de banda fijos, asegurados y máximos es idéntica a la explicada para las otras tecnologías y se establece para cada canal o longitud de onda de trabajo. La suma de los asegurados y/o fijos, no puede superar el valor máximo nominal del upstream. En el presente Trabajo se establece un upstream de 10 Gbps pues fue con el que se trabajó en la demo comentada en el siguiente apartado, por ese motivo, esta tecnología es tan potente pues sería como multiplicar por cuatro la capacidad del XGS-PON en total.
- Para una tasa nominal de 9,95328 Gbps (los 10 Gbps mencionados siempre en el documento) se emplea el código FEC *Reed-Solomon* (255,223). El soporte del FEC es obligatorio según la *cláusula 10.1.3* [55]. Y desde el punto de vista de funcionamiento de los servicios, el autor del presente Trabajo, recomienda su uso a pesar de la **penalización del 15% en el ancho de banda total simétrico** visto por longitud de onda para 10 Gbps.
- En la *cláusula 12* se establece el proceso de activación de una ONT (u ONU) y es quizás la cláusula más importante desde el punto de vista de un operador ya que puede ser la primera fuente de problemas: el registro de la ONT de un cliente en una OLT. En este proceso no sólo aparecen los mensajes necesarios para el registro de la ONT como los *Alloc_ID* para indicar cuándo transmitir o los mensajes para enviar el *Serial Number*, sino que además

intervienen los mensajes y temporizadores necesarios para una correcta sintonización y calibración del láser. Los mensajes más importantes que toda ONT debe soportar según el estándar son: *Burst_Profile*, *System_Profile* y *Channel_Profile*. A continuación, se explica el detalle de una activación de una ONT que es totalmente distinta a las otras tecnologías vistas:

- La ONT tiene por defecto, de fábrica, una longitud de onda trabajo para escuchar o recibir mensajes de la OLT y otra lambda para enviar asociada a la de downstream formando una pareja. Esta pareja de lambdas que viene de fábrica forman un *System_Profile* que la ONT puede actualizar en base a lo que reciba de la OLT durante el proceso de sintonización.
- Cuando una ONT se conecta recibe varias lambdas y escuchará por la que tenga por defecto. Guardará toda la información del *System_Profile*, *Channel_Profile* y *Burst_Profile*. Con ello se iniciará el proceso de ajuste y calibración de la longitud de onda ya que puede que la lambda de trabajo en downstream no sea la misma a la que se refiere los Profiles enviados. Cuando llegue a estar correctamente calibrado el láser para el upstream, enviará el *Serial_Number_ONU PLOAM* y se activará un temporizador para este proceso de “descubrimiento de ONT”.
- En caso de que no esté correctamente calibrada la ONT, dejará de escuchar durante un tiempo los mensajes PLOAM “en banda” y empleará el canal auxiliar AMCC. Cuando deje el canal de AMCC por estar correctamente calibrado su láser, la ONU y la OLT se enviarán mensajes de *Assign_ONU-ID*, *Calibration_Request*, o *Adjust_Tx_Wavelength* para asegurar la sincronización en esa lambda. Si no se recibe respuesta desde la OLT y expira el temporizador mencionado, entonces la ONT repetirá el paso de sintonización a otra lambda de trabajo.
- Cuando la ONT es correctamente reconocida a través de su serial number y se le dé un ONU ID para reconocer sus mensajes y sus intervalos de envíos de forma unívoca, se produce el proceso de ranging donde ajusta el intervalo para el upstream, el delay y se establece el canal de OMCC para llevar la futura configuración de servicios, puertos, protocolos, etc de la ONT. De aquí se pasa a un estado Operacional (llamado O5) que si fuera GPON o XGS-PON valdría para empezar a funcionar correctamente, sin embargo, en NG-PON2 hay más.
- Los estados O8 y O9 son los verdaderos estados operacionales de una ONT “colorless” pues en ellos se definen la posibilidad de que una ONT deba sincronizarse a una lambda o canal distinto. Es decir, una vez que una ONT ha sido reconocida y dada de alta en el sistema, en base a su configuración, puede ser una ONT de un servicio establecido para otra

lambda u otro cliente u otra lambda para otro operador. Por tanto, cuando pase estos estados, definidos como O8 para sintonización del downstream y O9 para el upstream, empezará a trabajar correctamente donde se le ha configurado.

- Se establecen las siguientes variaciones máximas de tiempos para las respuestas de las ONTs y los distintos retardos por la propagación para NG-PON2 en la *cláusula 13.1.2* para una ODN de 20 km como máximo entre OLT y ONTs.
 - o 200 microsegundos de jitter en el envío de tráfico
 - o 2 microsegundos de variación para el tiempo de respuesta de una ONT
- Se establece una duración de la ventana de silencio para recibir un número de serie de 250 microsegundos. De esta forma se obtiene también unas variaciones máximas por las que la OLT puede considerar que una ONT esté suplantando a otra. La sincronización en intervalos de envío es esencial para un sistema punto-multipunto como los Sistemas PON y por ese motivo, factores como las atenuaciones, las distintas distancias entre ONTs, distintos láseres y temperatura de los mismos, propagación por la fibra donde pueden haber reflexiones, pueden hacer que se varíe esa sincronización resultando en solapes, pérdidas de paquetes y mal funcionamiento del Sistema PON. El umbral marcado para indicar que una ventana de envío de una ONT se ha deslizado y solapado a otra ventana, se denomina DOW_i (*Drift of Window ONU i*) y el umbral que indica que una ONT puede estar solapando una ONT y actuar como Rogue ONT es el TIW_i (*Transmission Interference Warning*).

	In integer bit periods for specified line rate		In time units (approximately)
	2.48832 Gbit/s	9.95328 Gbit/s	
DOW_i	± 8 bits	± 32 bits	± 3.2 ns
TIW_i	± 16 bits	± 64 bits	± 6.4 ns

Tabla 31 Umbrales para evitar solapes de ventana en NG-PON2. Tabla 13-1 de G.989.3

La especificación G.989.3 también proporciona una base de procedimientos para la calibración del láser de las ONTs en servicio (posible acción posterior a la fase de alta de una ONT en un canal o puerto PON), handover de una lambda a otra debido a cambios de configuración en el cliente y una completa definición de los mensajes de la capa PLOAM que bien pueden servir de guía para entender los campos y datos intercambiados entre ONT y OLT.

Esta cantidad de procedimientos y de mensajes no se han podido capturar y analizar en el siguiente apartado donde se realiza una demostración (demo) de equipamiento de NG-PON2 ya que no se tienen analizadores de NG-PON2 entre OLT y ONT para ello, ni tampoco los equipos pueden realizar volcados de esta información pues aún son equipos no comerciales cuya confidencialidad en el funcionamiento hacen que sólo se puedan aportar resultados de tráfico y de sintonización de lambdas, pero no de mensajes que refuercen de forma práctica toda la base teórica aquí expuesta. No obstante, sirve como ejemplo para cualquier proceso de homologación pues es un resumen de lo más importante que se debe tener en cuenta para un análisis de ese tipo en los laboratorios de un operador.

4.3 Resultados de la demo de NG-PON2 y convivencia con otras tecnologías

A pesar de que aún los suministradores están trabajando en su equipamiento para NG-PON2 de cara a ofertar a los operadores un cierto abanico de soluciones como pueden ser la decisión de integrar o no en un mismo XFP todas las lambdas empleadas para NG-PON2 con el multiplexor WM integrado, elemento CEx enrackable junto con el chasis de la OLT o trabajar con ONUs coloreadas o no, en este Trabajo se van a exponer los resultados de una demostración de equipamiento o prueba piloto en las dependencias de Telefónica donde se corroboraron empíricamente diferentes aspectos que se explicaban en el anterior apartado:

- Funcionamiento de una a cuatro longitudes de onda distintas.
- Comprobación de los rangos de nm de trabajo expuestos por el estándar G.989.3.
- Máximos anchos de banda por lambda en ambos sentidos con FEC y sin FEC activado.
- Convivencia con tecnologías como GPON y XGS-PON en un sistema *Brown-Field* como indica el estándar G.989.1.
- Estabilidad de los equipos antes cambios de configuración y con distintas atenuaciones para cumplir con los niveles marcados en el estándar G.989.3.
- Funcionamiento de varios servicios en varias ONTs.
- Comprobación del funcionamiento de varias ONTs sobre la misma lambda y en distintas.

No se pudo probar el concepto de integración de láseres y WM en un mismo XFP ya que el prototipo no estaba disponible, pero a futuro parece una apuesta por los suministradores si la tecnología empieza a expandirse pues los costes estarían más

cubiertos. Ahora mismo, los costes de NG-PON2 son altos comparados con el GPON como se verá en el apartado 4.4. Integrar los láseres implicaría una reducción de fibras y espacio en las centrales, sin embargo, por el contrario, en caso de no funcionar el XFP dejaría sin servicio a muchos clientes de distintas lambdas, además de obligar al operador a que en cada ODN donde se conecte deban ir las cuatro lambdas y quizás lo que quiera el operador sea emplear ODNs separadas para las lambdas de NG-PON2 haciendo diferenciación a nivel, no sólo físico en lambdas, sino también por puerto PON. Las distintas posibilidades que generará NG-PON2 como se recalcó en el apartado 4.1, sin duda podrán determinar el éxito o no de su uso en los operadores, incluso a nivel de ofertas y servicios.

No obstante, gracias al equipamiento prestado y a las posibilidades del laboratorio de Telefónica se han podido probar “de primera mano” al menos la solución que explica la *Figura 95* donde se han configurado e instalado módulos XFP en vertical, en una misma tarjeta, que transmiten cada uno en una longitud de onda distinta con las siguientes condiciones de trabajo:

- Las fibras ópticas que salen de esos puertos PON, se conectan a un WM (multiplexor y demultiplexor) que permite agregar las longitudes en una sola fibra que luego irá conectada a un CEx que dará posibilidad a la convivencia con otras tecnologías en sentido downstream (y upstream).
- El equipo WM cuando reciba la señal de las ONUs demultiplexará las longitudes de onda y las llevará hacia los puertos PON donde se trabajará también en la longitud de onda de upstream. En la especificación G.989.2 aparece una asociación física de la longitud de onda de upstream con la de downstream, y advierte que durante el proceso de alta de una ONT se deberá enviar un mensaje especial (sólo creado para NG-PON2) llamado *Channel_Profile PLOAM message* que deberá indicar la longitud de onda de upstream con la que se trabaje asociada al downstream. Es decir, que el uso de las longitudes de onda irán pareadas y será el suministrador de equipamiento el que deberá informar al operador de cómo y qué valores exactos se emparejan, pues como se vio en el punto 4.2.2, las rejillas están expuestas en el estándar pero el suministrador debe demostrar que se trabaja con esos valores. Durante la demo se vio que la primera longitud de onda de downstream llevará asociada la primera del upstream, es decir 1596 nm será la lambda 1 y la OLT reconocerá clientes de la lambda 1 si transmiten en la lambda de 1532 nm, aproximadamente (primera del rango estandarizado si se emplea la opción *Narrow Band*).
- El suministrador podría indicar un comportamiento por defecto distinto en la asociación de las parejas de longitudes de onda. En este caso el equipo WM deberá ser aportado por el suministrador y explicado su funcionamiento para una correcta instalación. De ese funcionamiento dependerá la instalación ya que si el puerto 1 del WM multiplexa la lambda de 1596 nm y demultiplexa (manda hacia la OLT) la longitud de onda de 1532 nm por ejemplo, esto deberá

ser tenido en cuenta para el diagnóstico y mantenimiento de la ONT. En cualquier caso, esto sería más a título informativo para su mantenimiento siempre y cuando por configuración no se permita desasociar esa pareja expuesta como ejemplo recogido del estándar G.989.2. Es de obligada exigencia para el operador que estos aspectos queden reflejados en la documentación del producto y demostrados.

- Las ONTs se describieron como “*colorless*” o no según la especificación G.989. En esta demo, las ONTs pre-comerciales con las que se trabajó exigían una configuración manual de la longitud de onda de trabajo. Es decir, se debía entrar al equipo y configurar la pareja de lambdas con las que se iba a trabajar. Claramente no se cumplía una máxima de la especificación G.989 para la escalabilidad y flexibilidad del equipo y por ello se demostraba que aún era pronto para tener un equipo comercial. La intención de los fabricantes es trabajar en su versión comercial, en un futuro, con ONUs “*colorless*”.
- La última de las condiciones que se tuvieron en cuenta fue que los XFP conectados en los puertos PON tenían lambdas fijas. Es decir, los XFP venían serigrafiados con la longitud de trabajo y como tal debían conectarse en una tarjeta de puertos PON con configuración vertical y llevar esas conexiones a las entradas del WDM correspondientes para poder trabajar. La asociación de lambdas por parejas fue la siguiente según explicó el suministrador: la lambda más baja del downstream (1596 nm) se asociaba a la más baja del rango del upstream (1533 nm).

La forma de trabajar del WM vino determinada por el diseño que el suministrador haga de sus equipos en cuanto a la distribución de las longitudes de onda. Es decir, si el suministrador decide no integrar los láseres y el WM en un mismo XFP que sería una de las opciones menos costosas para ellos, debe establecer el patrón de uso del WM, informando perfectamente que la entrada 1 trabaja en una pareja de lambdas como aparece en el estándar, la entrada 2 a otra pareja distinta, etc y siempre informando y demostrando los valores de esas lambdas y los valores que caracterizan a un multiplexor como las pérdidas de inserción, directividad, pérdidas de retorno, etc. Además, puede ocurrir que por decisiones de diseño del fabricante y como parte de su oferta al operador, el elemento CEx y WM aparezcan juntos formando un mismo equipamiento como se mostraría a continuación.

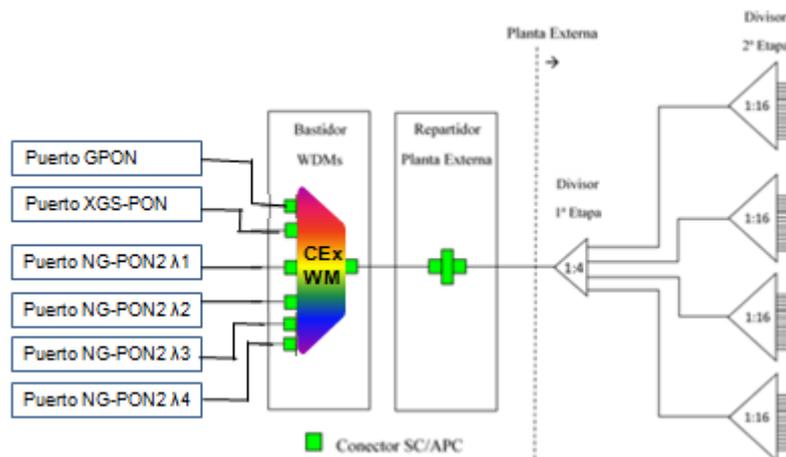


Figura 106 Diseño de solución NG-PON2 con WM y CEx integrado en mismo equipo

Como se puede comprobar, conceptualmente es una forma de trabajo más sencilla desde el punto de vista de la instalación y de su gestión y permite al suministrador de equipamiento controlar en todo momento lo configurado con lo que está realmente conectado. Además esta forma de trabajar no exige que deba ser totalmente rígida, es decir, no exige que se instalen 4 tipos distintos de XFPs, uno para cada lambda, ya que por configuración se puede hacer trabajar al XFP en una longitud de onda u otra, pero sí es cierto que un descontrol de la configuración afectará a la instalación pues el WM es rígido y necesitará que en sus puertos de entrada llegue la longitud de onda correcta para poder multiplexar hacia la ODN donde luego podrá haber convivencia o no de otras tecnologías gracias al CEx.

Dada la rigidez del WM un fabricante puede tomar la decisión de tener XFP con láseres fijos y evitar la posible confusión a la hora de configurar por parte de un operador y cuya fabricación sería más barata que otras opciones comentadas anteriormente como la de integrar los módulos ópticos más el WM en un mismo XFP. Una opción sin duda atractiva para el operador pero costosa. A día de hoy la evolución que se plantea es esa y quizás sea una futura mejora a probar en la siguiente demo que haya disponible.

Habiendo visto las distintas condiciones y opciones, finalmente, la forma de trabajar propuesta al operador Telefónica en los equipos precomerciales ha dado lugar al siguiente escenario de pruebas:

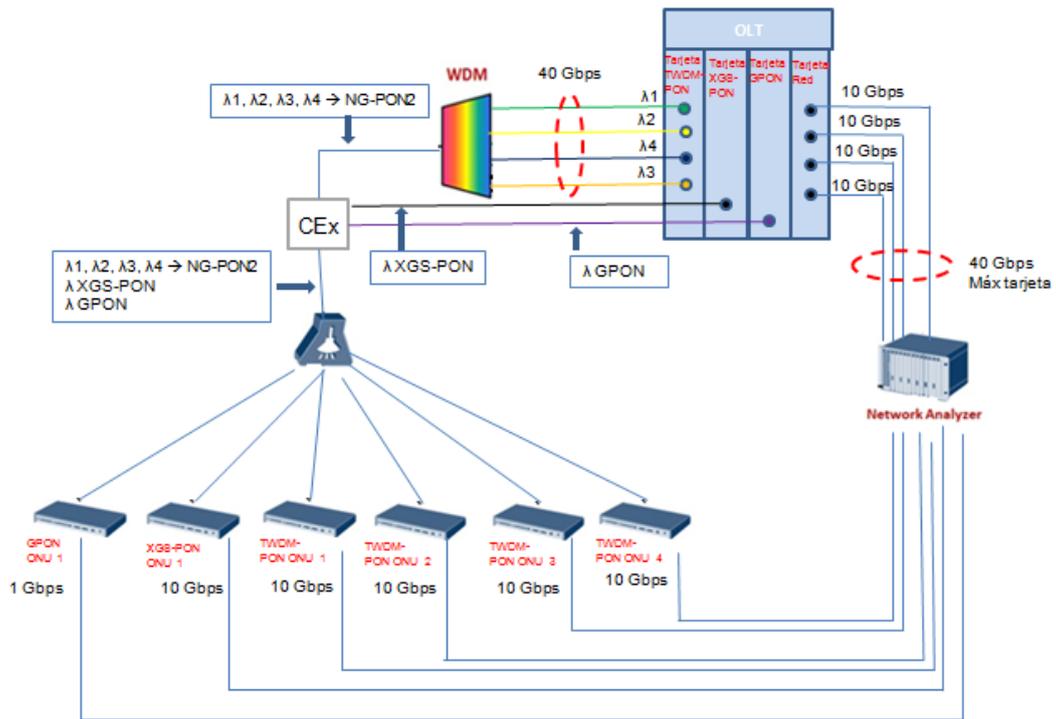


Figura 107 Escenario de pruebas con NG-PON2, XGS-PON y GPON inicial

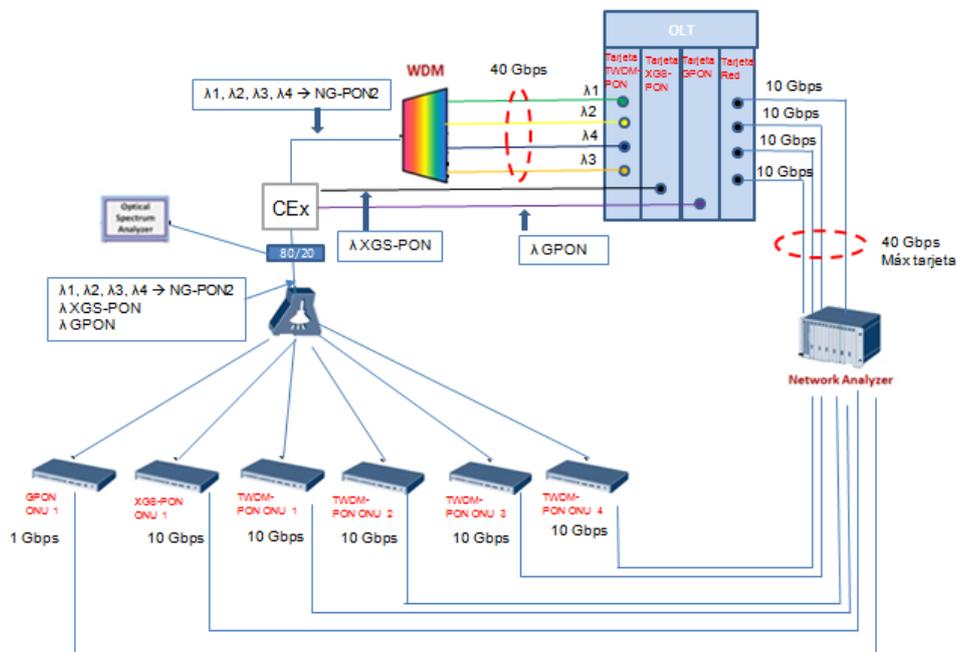


Figura 108 Escenario de pruebas con NG-PON2, XGS-PON y GPON y OSA

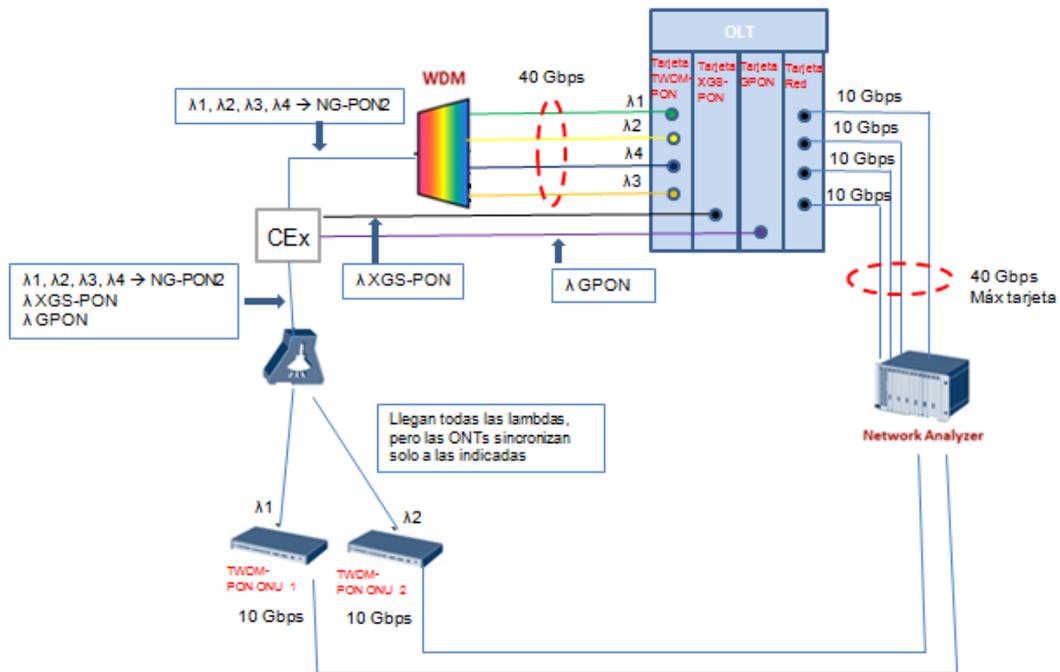


Figura 109 Escenario de pruebas con dos ONTs de NG-PON en distinta lambda

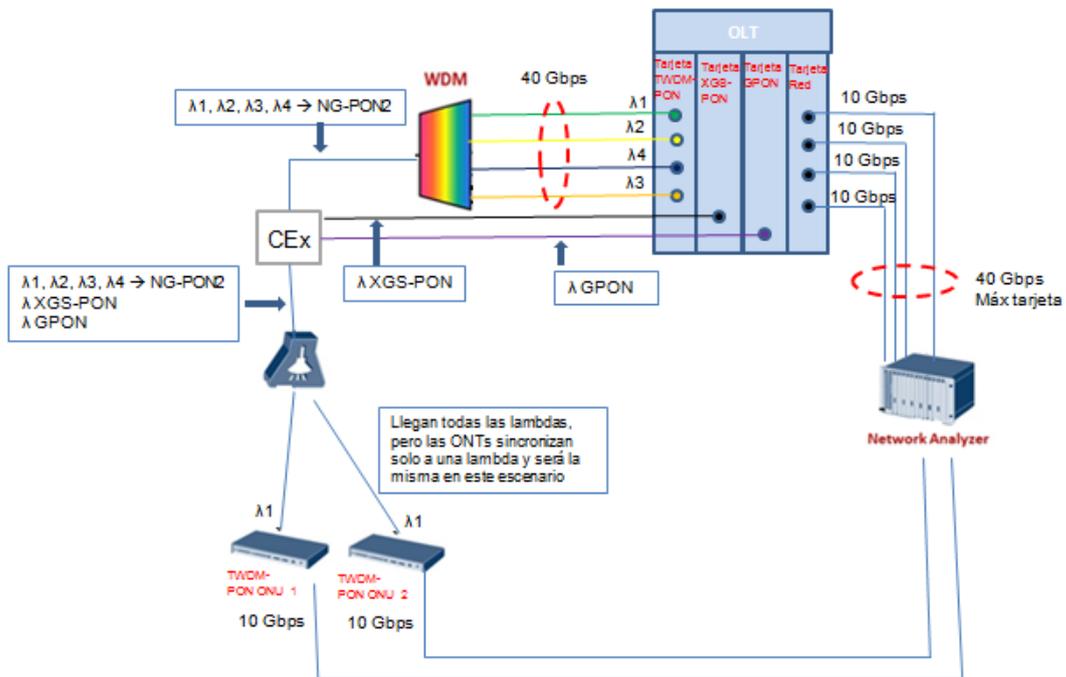


Figura 110 Escenario de pruebas con dos ONTs de NG-PON en misma lambda

En las figuras anteriores se muestran los distintos escenarios que se montaron para las pruebas. El escenario ideal sería con XGS-PON incluido y con 10 Gbps en su lambda, para hacer un total de 50 Gbps que saldrían del IXIA (generador de tráfico) y llegarían desde las ONTs por sus puertos de 10 Gbps hacia el generador de tráfico mencionado. Sin embargo, sólo se pudo trabajar con cuatro puertos de 10 Gbps para cada sentido del tráfico en el IXIA debido a la disposición del equipamiento de laboratorio y por ese motivo se fue variando el escenario y las pruebas de máximos. De estos escenarios salieron las siguientes configuraciones de servicios de conectividad (tipo Internet) y de Triple Play con IPTV, Internet y VoIP, todos generados con el IXIA simulando ser un tráfico normal de un usuario “de planta” (así se denomina a los clientes reales de un operador sean residenciales o empresas).

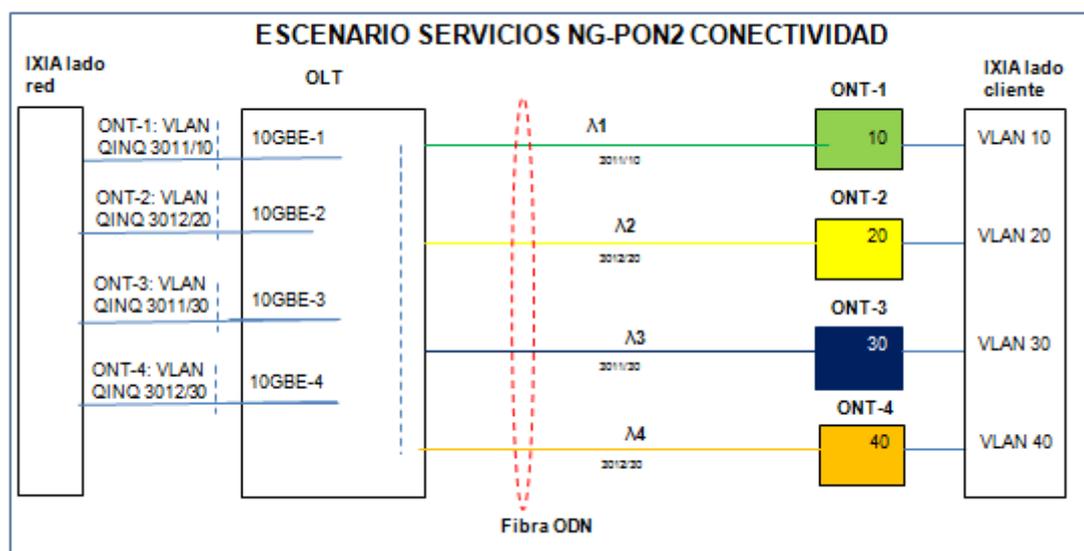


Figura 111 Configuración y esquema de servicio de conectividad con cuatro ONTs distinta lambda NG-PON2

Con el anterior esquema se pueden probar los máximos anchos de banda posibles que daría el NG-PON2 (40 Gbps simétricos). Además de funcionalidades de las ONTs y de la OLT como por ejemplo gestión de QoS, cambio de etiquetas 802.1q (lo que se conoce como taggeado). Para probar los servicios de Triple Play se emplearía la siguiente configuración donde se destaca que la vlan de multicast llevaría los canales IP como si fueran los canales multicast normales de IPTV, el tráfico unicast de IPTV que simularía el *Video-On-Demand*, el tráfico de VoIP (cuyo protocolo para comunicación emplea RTP o *Real Time Protocol*) y el tráfico de conectividad o Internet. La forma de diferenciar los tráficos es por vlan y entre usuarios se diferenciaría por IP o por MAC, por ejemplo. Los tráficos de VoIP e IPTV son enrutados y junto con el tráfico multicast se emplean direcciones IP entre los extremos de la comunicación.

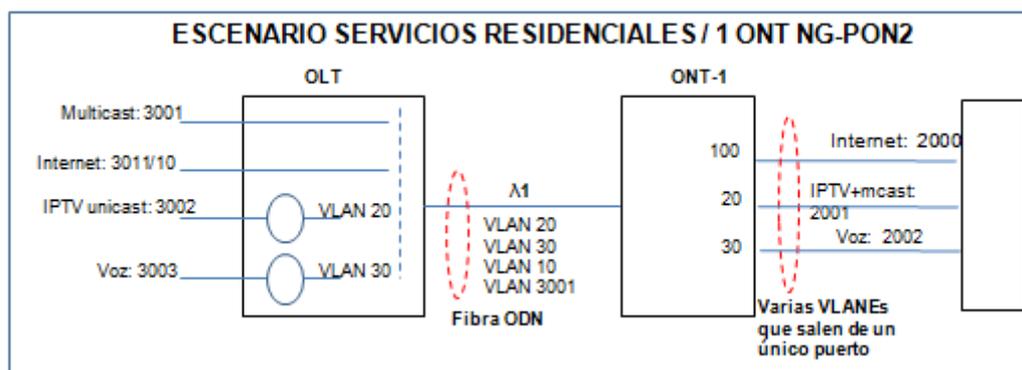


Figura 112 Configuración y esquema de servicio de Triple Play para una ONT de NG-PON2

Los elementos y equipos de trabajo con los que se desarrolló la demo fueron:

- OLT con una tarjeta compatible con NG-PON2. A día de hoy, las tarjetas de NG-PON2 son distintas de las que se emplean para clientes comerciales de GPON. Estas tarjetas de NG-PON2 pueden ser compatibles con la instalación de XFP para XGS-PON, dependiendo del fabricante, por lo que se pudo trabajar con convivencia de ambas tecnologías junto con el GPON. No se recomienda que la misma tarjeta lleve XFP de NG-PON2 y de XGS-PON por la desorganización de tecnologías y lambdas que eso puede desencadenar.
- Óptica modular mediante XFP para NG-PON2 que trabaja en los rangos de longitudes de onda estandarizadas. Se emplean hasta cuatro módulos, uno para cada longitud de onda de trabajo en downstream (pareada con una de upstream).
- Óptica modular mediante XFP para XGS-PON. Se emplea un solo módulo y estará conectado a otra tarjeta de línea distinta pues las tarjetas de las que se dispone son de 4 puertos y el NG-PON2 ya completa una.
- SW de OLT compatible con las tarjetas de NG-PON2. Uno de los factores más importantes a tener en cuenta para el estudio de costes es la posible migración de SW del equipamiento. En este caso sería necesario y sería uno de los motivos, por el que el **coste total por cliente de NG-PON2 en este 2016 estaría cercano al x10** (comparando con el coste de un cliente GPON), además de los costes por la complejidad electrónica necesaria para los elementos, fabricación de equipos, etc. La ventaja del equipo estudiado es que el chasis de OLT es compatible para incorporar tarjetas de GPON, XGS-PON y NG-PON2 siendo escalable con previsión a futuro.
- 4 ONUs del mismo modelo para empresas con XFP compatible con NG-PON2 (para poder trabajar con 4 lambdas distintas o 4 ONUs sintonizadas a lambdas distintas como permite el estándar G.989). Además, como se comprobó en la explicación del estándar, el interfaz UNI de la ONT para el caso de la demo

- podía ser de 10 Gbps ópticos o 1 Gbps Ethernet eléctricos para conectar un router de cliente.
- 1 ONU de empresa de XGS-PON para comprobar el escenario *Brown-Field*. Con interfaz de 1 Gbps Ethernet eléctrico o interfaz de 10 Gbps Ethernet ópticos.
 - Generador y simulador de tráfico (*IP Performance Tester*) del suministrador IXIA modelo *Optixia XM12* para comprobar los máximos del estándar con y sin FEC sobre varios servicios. Además, esto permite simular tráfico para ver casos de congestión y de funcionamiento de los equipos.
 - Analizador de espectros óptico (OSA) de *Anritsu modelo MS9710B* con conectores de entrada FC/APC y de amplio espectro de análisis.
 - Elemento WM o multiplexador de longitudes de onda para NG-PON2. Este elemento multiplexaría un máximo de cuatro lambdas distintas (las indicadas por el estándar como ya se explicó) en una sola fibra que iría conectada posteriormente a una de las entradas del CEx.
 - Elemento CEx para conectar una fibra de un puerto GPON, otro de XGS-PON y otro para llevar la señal ya multiplexada de hasta 4 lambdas distintas. Elemento básico para pruebas de convivencia.
 - Una ONT de GPON con router conectado y desco para IPTV. Equipamiento normal de un cliente residencial de Telefónica.
 - Splitter de 1:32 para obtener distintas fibras para poder conectar varios ONTs y formar una ODN con menor grado de división que en un despliegue comercial normal pero válido para la demo.
 - Splitter de 80/20 para derivar un 20% de la señal que sale del CEx hacia el OSA para observar las lambdas. El OSA no se puede poner en paso es necesario que sea terminación del esquema de fibra, de ahí que un porcentaje se lleve para su análisis y según se conecte este divisor se podrá observar una o varias longitudes de onda de downstream y/o de upstream.
 - Fibras y conectores varios para conectar los distintos equipos de la ODN entre OLT y ONTs. Los conectores SC/PC de las ONUs de NG-PON2 son distintos de los de GPON actual que son SC/APC, por tanto, las conexiones entre fibras deben ser cuidadosas pues como se verá más adelante en los resultados, las ONUs de NG-PON2 son muy sensibles a las atenuaciones y una mala conexión puede introducir muchas pérdidas al balance total.
 - Atenuador variable de *JDS Fitel* de amplio espectro para probar la sensibilidad introduciendo pérdidas por atenuación simulando el efecto de aumentar la distancia o conectores en paso.

Con este escenario expuesto, servicios y componentes, se pasaron a hacer las siguientes pruebas que, si bien no son completas para un proceso de homologación oficial, sí serían válidas para una prueba de concepto donde se ven las bondades o los puntos de mejora que los suministradores deben desarrollar para un óptimo funcionamiento:

- Configuración de ONTs en distintas lambdas y en la misma lambda → El operador debe determinar la forma de trabajar en la provisión e instalación de los clientes, de las ONTs. La forma de trabajar de los suministradores probados fue variada teniendo en cuenta las siguientes condiciones:
 - **Sintonización Dinámica *Pay-as-you-grow*** → La OLT determina la longitud de onda de sincronización con la ONT en función de los anchos de banda de los servicios de las ONTs que ya están activas en la ODN. Es decir, las ONTs se van provisionando y activando en la lambda 1 (puerto 1) y cuando el ancho de banda asegurado del servicio iésimo de la ONT N sobrepasa el máximo nominal de una lambda (10 Gbps) en upstream, entonces la ONT N+1 sintonizará con las lambdas de trabajo del puerto 2. En caso de no ser posible su activación por esta completo el PON por el ancho de banda, esa ONT quedaría fuera de servicio. La OLT es dinámica en este aspecto y el operador no controla la lambda de trabajo hasta que no hay una activación. En esta configuración existiría una longitud de onda maestra y otras esclavas. Además, en este tipo de provisión las ONTs deben ser “*colorless*”.
 - **Sintonización Dinámica Alternativa** → Se ha bautizado de esta forma pues es un tipo de sintonización como la anterior, pero alternando las lambdas. Es decir, la primera ONT entrará en la lambda 1, la segunda en la lambda 2, la tercera en la 3 y la cuarta en la 4. La quinta ONT en caso de que hubiera (en la demo no se tenían más que cuatro) se sintonizaría con la primera de las lambdas de trabajo y se volvería a repetir el ciclo hasta que la suma de los anchos de banda asegurados excede el límite del puerto y la ONT siguiente que quiera sintonizar tras sobrepasar el límite tendría que hacerlo en la siguiente lambda libre. En caso de no ser posible su activación por estar completo el PON por el ancho de banda, esa ONT quedaría fuera de servicio. En esta configuración existiría una longitud de onda maestra y otras esclavas. Además, las ONTs deben ser “*colorless*”.
 - **Sintonización Estática por comando** → Es la forma que define el estándar G.989.3 como la idónea para activar ONTs y que más se ha mencionado a lo largo del presente Trabajo. En la configuración se establece un *Channel_Profile* y cuando la ONT envía su identificador, la OLT le descarga ese *Profile* y empieza a trabajar en una pareja de longitudes de onda establecida. La ONT en este aspecto debe ser “*colorless*” para sintonizarse a la pareja de lambdas indicada por el operador. De esta forma se pueden definir ONTs para distintos servicios, distintos operadores si son de tipo NEBA o VULA, etc. Es la

forma más eficiente y controlada para la gestión de los clientes en distintas lambdas de NG-PON2, así como para la sintonización de las ONTs.

- **Sintonización Estática Local** → Las ONTs se configuran en local (se accede a ellas como un router para “abrir” una lambda de trabajo) y esa misma configuración debe quedar alineada con la que tenga la OLT para que le pueda provisionar los servicios correctamente. Se pueden emplear ONTs *coloreadas* o “no colorless” con lo que su funcionamiento o gestión parece más sencillo, pero resulta un inconveniente ante cualquier aspecto de supervisión ya que la configuración en local de la lambda podría obligar a que un técnico se desplace a la casa del cliente, elevando el gasto en operación y mantenimiento (OPEX) de esta tecnología.

NOTA: en las sintonizaciones estáticas, el operador debe tener constancia del valor de ancho de banda asegurado que queda por dar pues al contrario de lo que ocurría en el caso dinámico, la ONT N+1 directamente no se quedará activa, se quedará fuera de servicio, al no cumplir con los límites de la provisión al no tener hueco en la lambda configurada por sobrepasar el ancho de banda permitido.

- **Provisión de 4 ONUs u ONTs en distintas lambdas**→ Se conectan a la salida del splitter cuatro ONTs donde por configuración se le asignan dos lambdas de trabajo, una para cada sentido del tráfico. Por defecto las ONUs escuchan en una lambda determinada por fabricación y transmiten por otra que viene ya determinada por defecto. Esto es algo que el fabricante debe explicar al operador para poder trabajar en pruebas de instalación y conocer qué fallos puede haber.

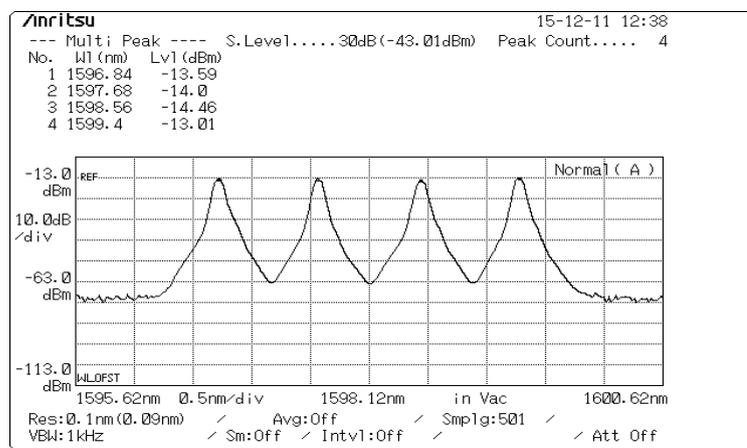


Figura 113 Longitudes de onda downstream demo NG-PON2

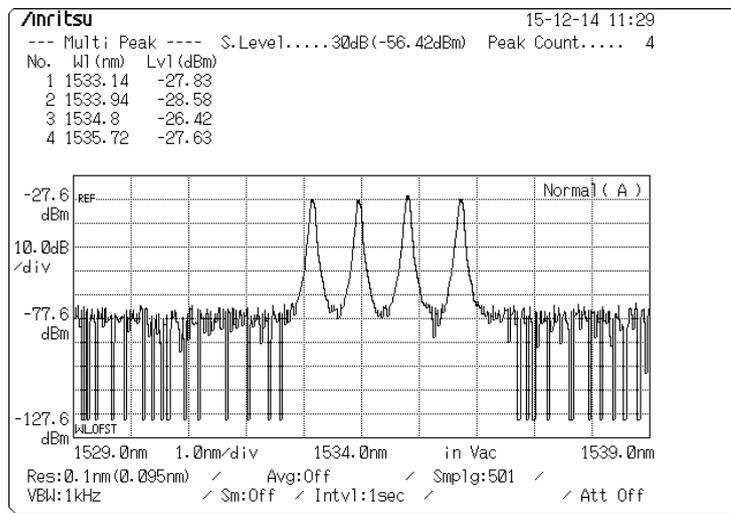


Figura 114 Longitudes de onda upstream demo NG-PON2

Dentro del rango descrito en el estándar se observan las siguientes longitudes de onda de downstream y de upstream. Como se puede comprobar, las longitudes de onda prácticamente están separadas por menos de 1 nm (exactamente 0,8 nm debido a la rejilla definida en el estándar de 100GHz de separación en términos de frecuencia) lo que viene a exigir una gran calibración y capacidad al WM multiplexor y a los filtros que llevan las ONUs y los puertos PON para poder trabajar.

Los rangos de trabajo del upstream están entre los 1533 y 1535 nm, mientras que para el downstream están entre el 1596 y 1599 nm. Los valores ópticos medidos no son concluyentes pues para poder montar el escenario de demo con el OSA conectado se tuvo que emplear el divisor óptico mencionado al principio del apartado y además las potencias ópticas transmitidas por las ONUs son bajas según informó el fabricante respecto a las de GPON, por ejemplo. Además, las fibras y conectores empleados son distintos para capturar un sentido u otro del tráfico pues el OSA no se puede poner en paso, sólo como elemento final de conexionado.

Las ONTs con las que se trabajó en la demo fueron de dos tipos, coloreadas y no coloreadas con lo que se pudieron probar distintas sintonizaciones, aunque los resultados fueron iguales para varias ONTs en la misma longitud de onda que para distintas, siendo el resultado más interesante que hasta cuatro ONTs funcionaron en distintas longitudes de onda (una por cada una).

- **Longitudes de onda de trabajo en convivencia con XGS-PON y GPON** → Se muestran las longitudes de trabajo de upstream y downstream. Como se puede comprobar a continuación las lambdas expuestas son prácticamente las mismas que describe el estándar. Para el caso de NG-PON2 será de vital importancia que la diferencia entre lo mostrado realmente y el estándar sea mínima para que no haya problemas de sintonización.

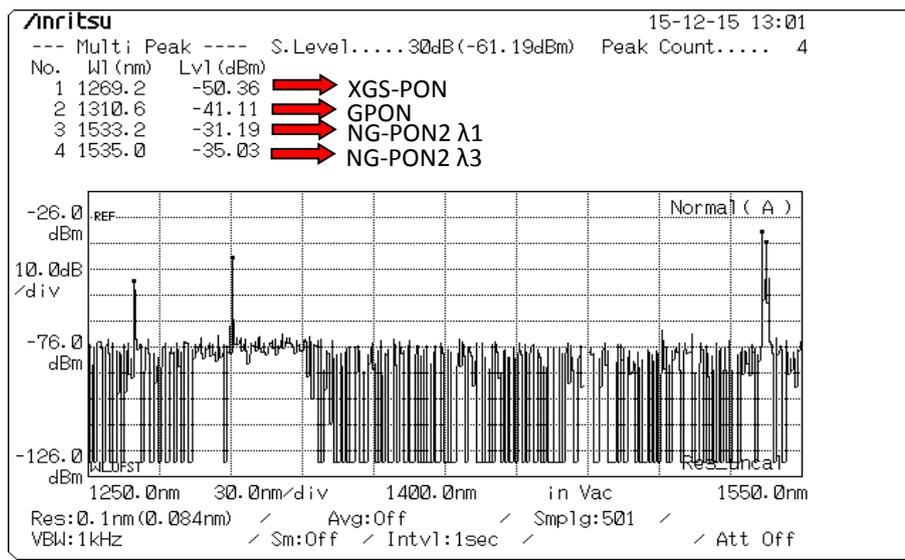


Figura 115 dos longitudes de onda upstream demo NG-PON2 convivencia con XGS-PON y GPON

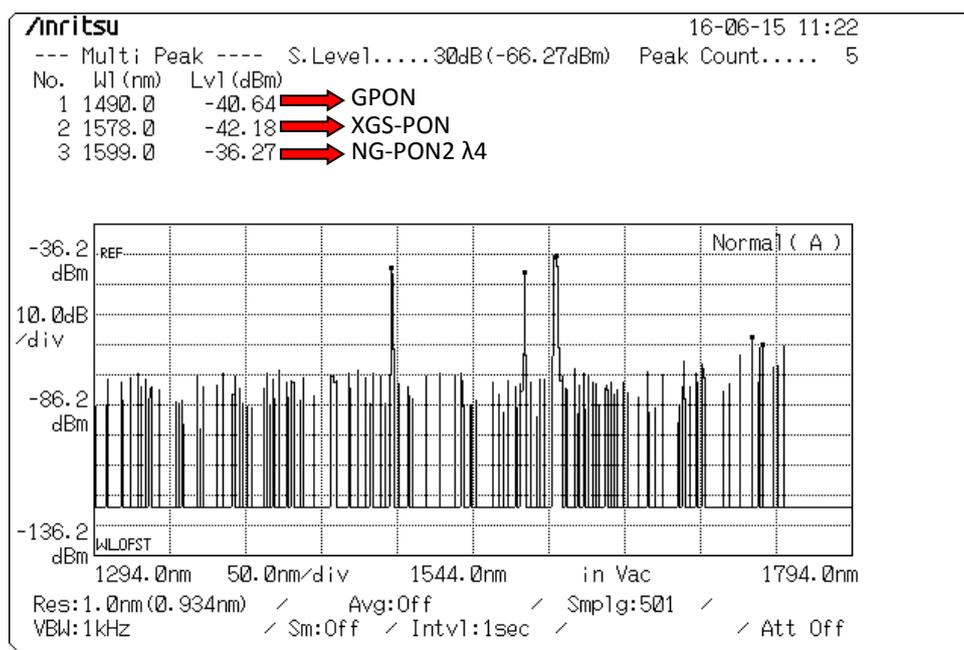


Figura 116 Una longitud de onda downstream NG-PON2 convivencia con XGS-PON y GPON

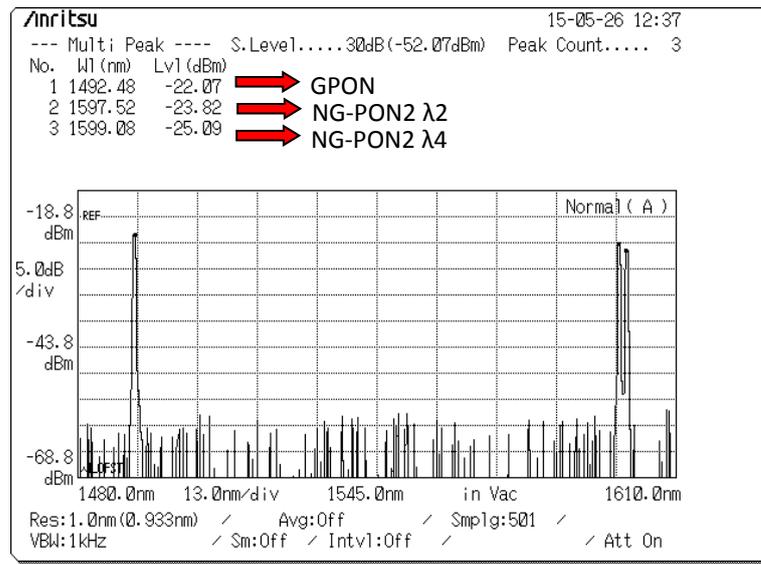


Figura 117 Dos longitudes de onda downstream demo NG-PON2 convivencia con GPON

Debido a las atenuaciones por pérdidas de inserción y de uso de distintos latiguillos de fibra óptica y del divisor óptico para conectar al OSA, los niveles de potencia óptica recibidos que se muestran en las capturas anteriores no han sido tenidos en cuenta las pruebas. Lo más importante de estas pruebas y capturas es ver las lambdas empleadas por las distintas tecnologías.

- **Sintonización de varias ONUs sobre la misma lambda** (sólo se conectan dos ONUs en esta prueba) → Al tener conectada la salida de los cuatro puertos PON a la ODN, en el OSA si analizamos las longitudes de onda de downstream, se verían las cuatro de forma constante. Sin embargo, para saber si una ONU está sintonizada y funcionando, al analizar con el OSA el upstream, se debe ver en el caso de la demo, una sola lambda y no dos, al tener las dos ONUs configuradas para que trabajen en la misma lambda.

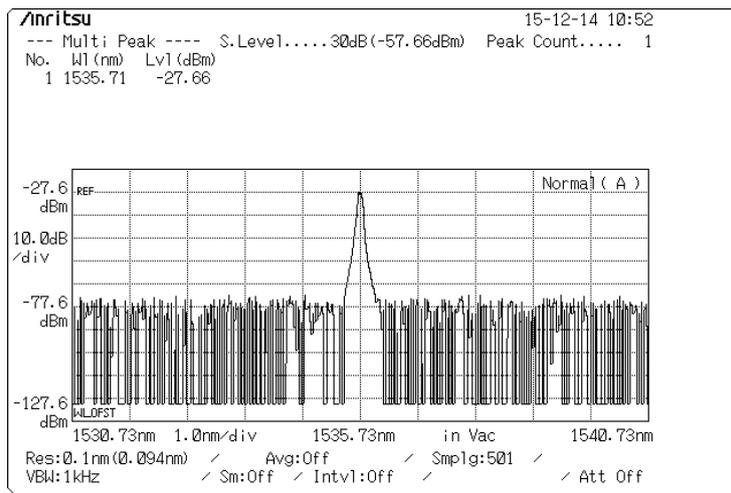


Figura 118 Longitud de onda upstream demo NG-PON2. Dos ONUs en misma lambda

- **Sensibilidad de una ONU de NG-PON2** → en esta prueba se emplea el atenuador variable de amplios espectro de JDS para aumentar la atenuación en la ODN. Concretamente en esta prueba se debe perseguir el siguiente objetivo: observar el aumento de la atenuación en una longitud de onda sin afectar a las demás y medir también el valor máximo de pérdidas soportado por el enlace. Para ello, se debe conectar el atenuador a una de las salidas del splitter donde se van conectadas una de las ONUs para variar su atenuación sin que afecte al árbol entero de la ODN. Al llegar al punto de pérdida de sincronización de la ONU se podrá determinar el valor de balance óptico que ya se comentó en el apartado 4.2.2.

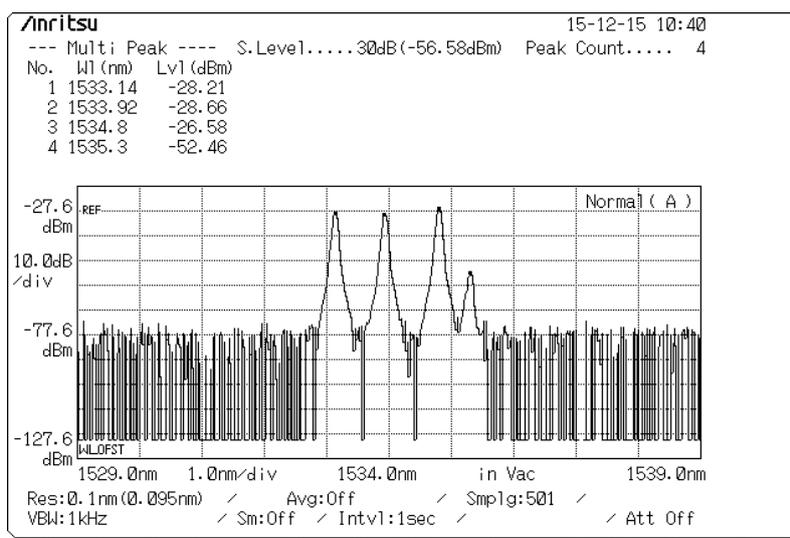


Figura 119 Longitud de onda upstream atenuada demo NG-PON2 sin afectar a otras

ont-id - FEC	Sensibilidad ONT (dBm)	Potencia transmitida OLT (dBm)	Balance óptico (dB)
ONT con FEC	-30	-1	29
ONT sin FEC	-28,6	-1	27,6

Tabla 32 Estudio Sensibilidad y Balance Óptico con NG-PON2

Tal y como se comentó anteriormente, las medidas ópticas que aporta el OSA no son determinantes para el estudio. Para el análisis de la sensibilidad y del balance óptico se fue aumentando la atenuación gradualmente hasta que la ONT empezó a tener pérdidas de tráfico o perdió la sincronización y para observar la potencia recibida se fue consultando a la ONT desde la OLT por comando. Durante las pruebas se observó que la ONT con el FEC activado presenta un balance óptico mayor, a igual potencia transmitida de la OLT (los XFPs transmitían a potencias muy parecidas dando igual la lambda de trabajo), que sin FEC. El hecho de emplear FEC repercute en una pérdida del máximo valor de ancho de banda (throughput) posible como se demostrará un poco más adelante, pero sin duda parece imprescindible para el correcto funcionamiento de la tecnología a niveles bajos de potencia óptica recibida en la ONT.

Cabe destacar que, con estas pruebas, en esta demo se demuestra que la tecnología del XFP aún debe mejorar pues emitir a -1 dBm es demasiado bajo para un equipo que tiene una sensibilidad de -30 dBm con FEC activado y que además se queda en su balance óptico justo en los 29 dB que demanda la Clase N1 del estándar G.989.2.

- **Máximo ancho de banda simétrico alcanzable en una sola longitud de onda de NG-PON2 sin FEC** con tráfico generado por el equipo IXIA simulando un servicio de conectividad como Internet empleando una sola ONT en la lambda establecida para probar.
 - o Máximo alcanzado en downstream (saturación del enlace de 10 Gbps) → 9.8 Gbps.
 - o Máximo alcanzado en upstream (saturación del enlace de 10 Gbps) → 9.6 Gbps.

Con lo cual se puede establecer el verdadero máximo simétrico para un servicio de conectividad sobre NG-PON2 con una sola ONT en una lambda de trabajo de esta nueva tecnología.

Traffic Item	Tx Frames	Rx Frames	Loss %	Tx Rate (Mbps)	Rx Rate (Mbps)
INET Down	77067681	77067533	0.000	9.500.002	9.474.504
INET UP	77263712	77263607	0.000	9.499.996	9.525.487

Tabla 33 Máximo simétrico en servicio Internet simulado en una ONT NG-PON2 sin FEC

- **Máximo ancho de banda alcanzable en una sola longitud de onda de NG-PON2 con FEC** con tráfico generado por el equipo IXIA simulando un servicio de conectividad como Internet.
 - o Máximo alcanzado en downstream (saturación del enlace de 10 Gbps) → **8.5 Gbps.**
 - o Máximo alcanzado en upstream (saturación del enlace de 10 Gbps) → **8.5 Gbps.**

Stat Name	Port Name	Line Speed	Link State	Tx. Rate (Mbps)	Rx. Rate (Mbps)
4 172.70.10.117/Card06/Port04	10GE LAN - 004	10GE LAN	Link Up	9,000.004	1,002.667
5 172.70.10.117/Card05/Port01	10GE LAN - 005	10GE LAN	Link Up	0.000	0.000
6 172.70.10.117/Card05/Port02	10GE LAN - 006	10GE LAN	Link Up	0.000	0.000
7 172.70.10.117/Card05/Port03	10GE LAN - 007	10GE LAN	Link Up	0.000	0.000
8 172.70.10.117/Card05/Port04	10GE LAN - 008	10GE LAN	Link Up	2,999.991	8,570.879

Tabla 34 Máximo BW downstream en servicio Internet simulado en una ONT NG-PON2 con FEC

Con estos resultados se demuestra que, por longitud de onda, el máximo efectivo en términos de BW es de alrededor de 8.5 Gbps con un tráfico donde se emplea el taggeado ya comentado en el anterior capítulo de Q-in-Q y donde al menos en la capa física se obtiene un throughput teórico según estándar de:

DS Nominal line rate, Gbit/s	9.95328	
DS PHY Frame Size, bytes	155520	
	FEC On	FEC Off
DS FS frame size, bytes	135432	155496

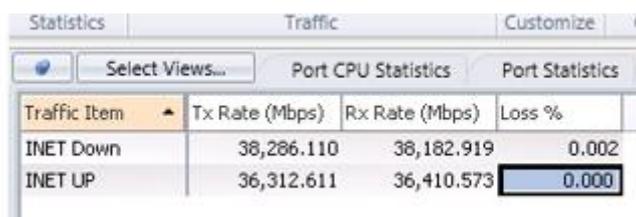
Tabla 35 Tabla 8-1 del estándar G.989.2. Tamaño de trama NG-PON2 y tasa de downstream teórica

Cálculos teóricos Estándar G.989.3 NG-PON2	
Tasa nominal DL (Gbps)	9,9533E+09
trama NG-PON2 total (Bytes)	155520
trama XGTC con FEC (Bytes) sin cabeceras	135432
trama XGTC sin FEC (Bytes) sin cabeceras	155496
Tasa DL con FEC (Gbps)	8,67E+09
Tasa DL sin FEC (Gbps)	9,9517E+09

Tabla 36 Estudio de tasas teóricas según FEC

Por tanto, es un poco menos de lo esperado pues el generador mide la tasa a nivel Ethernet y el estándar aplica sus cálculos a la trama de datos de NG-PON2 quitando cabeceras por FEC según se vio en la *Figura 33* del presente Trabajo. En cualquier caso, el resultado hallado es el que debe determinar los cálculos de los operadores de cara a la planificación de los máximos anchos de banda posibles a compartir entre los usuarios. Además, se demuestra que el resultado es igual que el hallado para el XGS-PON pues la trama, cabeceras y anchos de banda de guarda son los mismos para una sola longitud de onda de NG-PON2.

- **Máximo ancho de banda alcanzable empleando las cuatro longitudes de onda del NG-PON2 sin FEC activado** → el objetivo de la prueba fue determinar el máximo ancho de banda posible sin FEC para una tarjeta de puertos PON con cuatro láseres conectados y funcionando a distintas longitudes de onda. Cada puerto PON llevaría una sola ONT conectada que llevaría una configuración de 10 Gbps simétricos. Es decir, se usaron para la prueba cuatro ONTs, cada una sintonizada a una lambda de trabajo. Se recuerda en este punto que cuando se menciona “lambda de trabajo” se refiere a lambda de downstream como establece el estándar y cada una lleva asociada una lambda de upstream, por tanto, aunque no se mencione como tal, cada ONT estaría trabajando con una pareja de lambdas (una para cada sentido) y a su vez, distintas de otras parejas para poder trabajar así con hasta cuatro ONTs sintonizadas en distintas lambdas/frecuencias.



Traffic Item	Tx Rate (Mbps)	Rx Rate (Mbps)	Loss %
INET Down	38,286.110	38,182.919	0.002
INET UP	36,312.611	36,410.573	0.000

Tabla 37 Resultado máximos simétricos 40 Gbps sin FEC

El máximo observado para cada sentido por lambda sería:

- Downstream → 38.182 Gbps / 4 = **9.545 Gbps**
- Upstream → 36,410 Gbps / 4 = **9.1 Gbps**

NOTA1: en upstream se obtiene más tasa de la inyectada porque la OLT introduce por cada paquete de Ethernet, 4 Bytes como resultado del doble tag del Q-in-Q. El tamaño del paquete introducido fue de 1482 Bytes a nivel Ethernet.

NOTA2: se obtiene este valor de upstream porque a tasas mayores, algunas ONTs sufrieron pérdidas por errores de bits al no estar el FEC activado debido a que no todos los XFP se comportaban igual ni las fibras podrían estar todo lo limpias que deberían estar. En cualquier caso, el máximo que se debería obtener en la demo no es el teórico calculado por lambda, sino el que se mostró en la *Tabla 33*, por tanto, se debería haber obtenido una tasa de $4 * 9,525 \text{ Gbps} = 38.1 \text{ Gbps}$. De esta forma se obtendría que el máximo simétrico posible sin FEC es de **9.5 Gbps por cada lambda * 4 lambdas = 38 Gbps** aproximadamente de los 40 Gbps nominales que marca el estándar G.989.

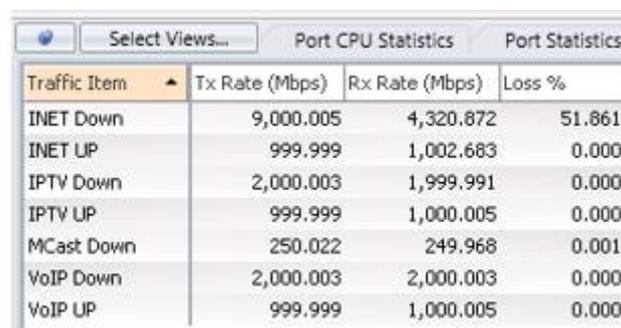
- **El máximo ancho de banda alcanzable empleando las cuatro longitudes de onda del NG-PON2 con FEC activado** → Se obtuvo de forma simétrica los 8.5 Gbps que se observaron en las pruebas con una sola ONT, por tanto, el resultado fue:
 - $4 * 8,5 \text{ Gbps} = 34 \text{ Gbps reales con FEC activado}$
 - **Eficiencia con FEC activado del 85% a nivel Ethernet** del máximo teórico establecido en la norma G.989.
- **El máximo ancho de banda simétrico observado empleando Jumbo Frames con FEC activado** → Para la prueba se configuraron en el generador de tráfico dos flujos simétricos de 8.5 Gbps con tramas de 9000 Bytes, el máximo establecido para las Jumbo Frames.

Tx Port	Rx Port	Traffic Item	Loss %	Tx Rate (Mbps)	Rx Rate (Mbps)
Red puerto1	User ONT1	ONT-1 - 9Gbps	0.000	8.570.016	8.566.171
User ONT1	Red puerto1	ONT-1 - 9Gbps UP	13.690	8.420.004	7.271.234

Tabla 38 Resultado máximos simétricos una ONT NG-PON2 con Jumbo Frame

Este resultado indica que para poder trabajar sin pérdidas con esta simulación, el tráfico inyectado en upstream no debe superar 7.2 Gbps, por tanto se obtiene una eficiencia de 72% para este tipo de tramas en este sentido del tráfico.

- **Convivencia y gestión de las prioridades (QoS) al emplear varios servicios** → En esta prueba se pretende comprobar el criterio de calidad de servicio aplicado a los servicios configurados en las distintas ONTs. En concreto se pretende saturar un puerto PON de 10 Gbps en downstream inyectando más de 10 Gbps desde el generador de tráfico hacia un mismo destino. Como se vio, la eficiencia sin FEC era de 98% aproximadamente y por ese motivo, el tráfico debería repartirse de forma que le llegue más tráfico al más prioritario. No se han configurado para la prueba asignaciones de pesos para asegurar un porcentaje de tasa mínima recibida.



Traffic Item	Tx Rate (Mbps)	Rx Rate (Mbps)	Loss %
INET Down	9,000.005	4,320.872	51.861
INET UP	999.999	1,002.683	0.000
IPTV Down	2,000.003	1,999.991	0.000
IPTV UP	999.999	1,000.005	0.000
MCast Down	250.022	249.968	0.001
VoIP Down	2,000.003	2,000.003	0.000
VoIP UP	999.999	1,000.005	0.000

Tabla 39 Resultado Saturación puerto PON downstream distintos servicios

Como se puede comprobar el tráfico INET (simulación de Internet) en down cae un 51% mientras que los demás servicios no tienen pérdidas. Las QoS configuradas para la prueba fueron a nivel Ethernet gracias al pbit:

- Inet = pbit 1
- IPTV = pbit 4
- Mcast = pbit 4
- VoIP = pbit 5

Con estas calidades se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla anterior. A continuación, se explica más en detalle el escenario de pruebas configurado:

- Puerto 1 del IXIA inyecta 9 Gbps de INET llegando 4.3 Gbps.

- Puerto 2 del IXIA inyecta los siguientes tráficos
 - IPTV = 2 Gbps
 - Mcast = 250 Mbps
 - VoIP = 2 Gbps
 - Total = 4.25 Gbps
 - Total tráfico transmitido = 13.250 Gbps
 - Total tráfico recibido = (4.25 + 4.32) Gbps = 8.57 Gbps (con FEC activado).
- **Máximo ancho de banda alcanzable empleando dos ONTs en la misma lambda de NG-PON2 con FEC activado** → en esta prueba se observaron dos resultados distintos. Por un lado, uno de los suministradores sólo permitía una configuración donde el máximo ancho de banda fuera igual al ancho de banda asegurado (si había más de una ONT en la misma lambda gracias al tipo de provisión de *Sintonización Fija por Comando*) con lo cual se encontró una limitación en el número de ONTs configurables además de que el máximo valor de asegurado era muy pequeño, por tanto, eso sería un reparo dentro de un proceso oficial de homologación. En el otro suministrador sí se pudo probar el funcionamiento de servicios con dos ONTs sobre la misma lambda (las ONTs eran “no colorless”) y se obtuvo el siguiente resultado:

Traffic Item	Tx Rate (Mbps)	Rx Rate (Mbps)	Loss %
ONT-1p4 – Downstream	3.000.000	2.991.969	0.000
ONT-2p4 - Downstream	3.000.000	2.991.975	0.000
ONT-1p0 – Downstream	2.000.002	1.293.489	35.151
ONT-2p0 – Downstream	2.000.002	1.293.471	35.151

Tabla 40 Resultado Saturación downstream distintas calidades dos ONTs misma lambda NG-PON2

En la anterior tabla se muestra un resultado esperado desde el punto de vista de la calidad de servicio en casos de congestión. Inyectando tráfico en dos ONTs en sentido downstream empleando dos calidades distintas, el tráfico que viaja con menor prioridad (p0) es descartado antes que el de mayor prioridad. Equivale a demostrar que un tráfico de servicio, como Internet de tipo *Best Effort* por regla general, se descarta antes que un tráfico de mayor exigencia y calidad como sería IPTV que en esta prueba equivaldría a p4.

Traffic Item	Tx Rate (Mbps)	Rx Rate (Mbps)	Loss %
ONT-1p4 - 4Gbps	1.999.996	1.994.640	0.000
ONT-2p4 - 4Gbps	1.999.996	1.994.640	0.000
ONT-1p0 - 4Gbps	2.000.002	1.994.634	0.000
ONT-2p0 - 4Gbps	2.000.002	1.994.640	0.000
ONT-1p0 - 4Gbps UP	1.799.997	1.804.679	0.000
ONT-1p4 4Gbps UP	1.800.003	1.804.822	0.000
ONT-2p0 UP	1.799.997	1.804.930	0.000
ONT-2p4 4Gbps UP	1.800.003	1.804.816	0.000

Tabla 41 Resultado sin pérdidas distintas calidades dos ONTs misma lambda NG-PON2

En la anterior tabla se muestra un resultado esperado desde el punto de vista de la calidad de servicio en caso de no congestión. Por aspectos de nomenclatura en las distintas pruebas realizadas aparece la coletilla de “4 Gbps”, sin embargo, eso no debe llevar a error pues los datos más importantes son los de TX Rate, RX Rate y Loss, donde se puede observar que no hay pérdidas de tráfico de ninguna calidad pues no habría saturación como sí pasaba en lo observado en Tabla 40.

Traffic Item	Tx Rate (Mbps)	Rx Rate (Mbps)	Loss %
ONT-1p0 - 4Gbps UP	4.000.004	2.323.468	42.055
ONT-1p4 4Gbps UP	1.799.997	1.804.936	0.000
ONT-2p0 UP	4.000.004	1.999.063	50.153
ONT-2p4 4Gbps UP	1.799.997	1.804.822	0.000

Tabla 42 Resultado Saturación upstream distintas calidades dos ONTs misma lambda NG-PON2

En la anterior tabla se muestra un resultado esperado desde el punto de vista de la calidad de servicio en casos de congestión, pero en este caso para el upstream. Inyectando tráfico en dos ONTs en sentido upstream empleando dos calidades distintas, el tráfico que viaja con menor prioridad (p0) es descartado antes que el de mayor prioridad. Equivale a demostrar que un tráfico de servicio, como Internet de tipo *Best Effort* por regla general, se descarta antes que un tráfico de mayor exigencia y calidad como sería IPTV que en esta prueba equivaldría a p4.

Por lo tanto, con estos resultados se demuestra que:

- La **tecnología NG-PON2** en ciertas condiciones **no está aún madura** como se ha podido comprobar por la limitación en cuanto a la configuración de los límites del ancho de banda asegurado y máximo asociados al servicio de conectividad como se ha explicado anteriormente. Esto se une a que las ONTs probadas no permitían funcionamiento “*colorless*” como se aconseja como forma eficiente de trabajo en un despliegue comercial desde el presente documento, lo que implica falta de madurez.
 - La gestión de QoS sobre una lambda con una o varias ONTs configuradas es correcta y se deja pasar el **100% del tráfico** de mayor prioridad.
 - El estudio de algoritmos ante congestión de tráfico puede ser un punto a tener en cuenta para la gestión de los servicios por parte de un operador. Es vital ajustar los anchos de banda asegurados de acuerdo a las exigencias del servicio a ofertar, y observar las pérdidas en casos de saturación si se trabaja con algoritmos como *Strict Priority* o *Weight Round Robin (WRR)*, incluso una combinación de ambas, por ejemplo. **Desde el presente Trabajo se aconseja ajustar el ancho de banda para poder ofrecer servicios diferenciados a clientes que verdaderamente necesiten un cierto volumen de tráfico sostenido en casos congestión** como aquellas empresas que requieran mucha capacidad para subir contenido o trabajan con aplicaciones en la “nube”. Además, empleando WRR para tráficos de baja prioridad y que por tanto son menos sensibles a las pérdidas de tráfico en caso de saturación junto con *Strict Priority* para los tráficos de mayor prioridad como la VoIP que deben tener mínimas pérdidas y retardos mínimos, se puede alcanzar un empleo óptimo para la gestión del tráfico en las redes de acceso.
- **Funcionamiento de servicios en convivencia con distintas tecnologías** → en estas pruebas se buscaron objetivos de estabilidad y de funcionamiento de varias ONTs de distintas tecnologías sobre la misma ODN. En concreto de GPON con una o varias lambdas de NG-PON2 de tal forma que la saturación de un puerto PON de NG-PON2 no hacía perder tráfico a la ONT de GPON al ir en distinta lambda, distinto puerto PON.

Tx Port	Rx Port	Traffic Item	Tx Rate (Mbps)	Rx Rate (Mbps)	Loss %
Red puerto1	User ONT1	ONT-1 - 9Gbps	8.880.957	8.570.904	3.232
Red puerto1	USER ONT GPON	ONT-3 - 1Gbps	986.773	984.127	0.000
Red puerto2	User ONT2	ONT-2 - 10Gbps	9.867.730	8.570.904	12.909
User ONT1	Red puerto1	ONT-1 - 9Gbps UP	9.000.001	8.463.159	6.225
User ONT2	Red puerto2	ONT-2 - 10Gbps UP	9.867.730	8.463.153	14.471
USER ONT GPON	Red puerto1	ONT-3 - 1Gbps UP	986.773	989.395	0.000

Tabla 43 Resultado Saturación down/up distintas calidades dos ONTs NG-PON2 y ONT GPON

Tx Port	Rx Port	Traffic Item	Tx Rate (Mbps)	Rx Rate (Mbps)	Loss %
Red puerto1	User ONT1	ONT-1 - 9Gbps	8.570.006	8.547.024	0.000
User ONT1	Red puerto1	ONT-1 - 9Gbps UP	8.420.001	8.442.580	0.000
Red puerto2	User ONT2	ONT-2 - 10Gbps	8.570.006	8.547.030	0.000
User ONT2	Red puerto2	ONT-2 - 10Gbps UP	8.420.001	8.442.568	0.000
Red puerto1	USER ONT GPON	ONT-3 - 1Gbps	985.000	982.360	0.000
USER ONT GPON	Red puerto1	ONT-3 - 1Gbps UP	986.773	989.395	0.000

Tabla 44 Resultado sin Saturación down/up distintas calidades dos ONTs NG-PON2 y ONT GPON

Como se puede comprobar tanto en la Tabla 26 como en la 27 se obtiene 0% de pérdidas en el tráfico de la ONT de GPON, mientras que en las dos lambdas empleadas para NG-PON2 con una ONT sintonizada en cada una sí pierde con tráficos que llegan a saturar con FEC activado. Esto demuestra que la tecnología óptica existente en el sistema no introduce pérdidas ni extraños comportamientos en ONTs o servicios de distintas tecnologías.

- **Análisis de las pérdidas de inserción del módulo WM y del módulo CEx** → durante una de las demos se pudo constatar el valor de las pérdidas de inserción que introducen los dos módulos o elementos citados. Son componentes pasivos que deben introducir las menores pérdidas posibles para ajustarse al balance óptico propuesto por la serie G.989, en el despliegue comercial real de un sistema con NG-PON2 y convivencia con otras tecnologías. Los resultados obtenidos fueron:
 - Medida de pérdida de inserción para WM para cuatro longitudes de onda:
 - Potencia de entrada downstream → -2,8 dBm
 - Potencia de salida downstream (fibra hacia el CEx) → -4,4 dBm
 - Valor de pérdidas de inserción downstream= -2,8 – (-4,4) = 1.6 dB.

- Para el upstream se midieron 2 dB de pérdidas aunque puede variar 0.1 – 0.2 dB según la longitud de onda de trabajo. El fabricante debe dejar claro el análisis del equipo para diseñar la red posteriormente y siempre se deberá coger el valor máximo de pérdidas.
- Medida de pérdida de inserción para CEx. Una forma de poder hallar las pérdidas introducidas es consultar la potencia óptica recibida sin él entre OLT y ONT (por ejemplo, de NG-PON2 en su pareja de lambdas 1) y luego conectarlo en paso y volver a consultar. De esta forma se obtiene un valor de 0.5 dB para el downstream y de 0.6 para el upstream. Por tanto, para una planificación de diseño de red se deberían emplear 0.6 dB para el análisis del balance óptico.

Finalmente, a partir de los resultados de la demo **se pueden extraer las siguientes conclusiones:**

- El esquema de trabajo propuesto para las longitudes de onda (instalación y funcionamiento de los XFP) y las conexiones físicas de las fibras con los elementos del sistema óptico es el factor más importante a tener en cuenta para el despliegue. **Dependiendo de qué XFP se vayan a emplear así se hará el diseño de la instalación y el coste asociado.**
- La tecnología, a pesar de que el estándar esté prácticamente cerrado y se lleven varios años trabajando con él y haciendo prototipos, aún está en una **fase poco madura para uso comercial**. Las distintas tecnologías y electrónicas empleadas aún deben ser más eficientes y menos costosas para poder emplear, por ejemplo, ONTs *colorless* como indica el estándar.
- La potencia de los módulos ópticos XFP de la OLT es aún baja comparado con los valores conocidos para GPON donde suelen estar cerca de los 2.5 dBm. Si bien es cierto que cumple con la clase N1 de valor máximo de atenuaciones, la potencia es aún muy baja en la transmisión hacia las ONTs, indicando que la opto-electrónica aún no está madura como para trabajar a esas longitudes de onda.
- El sistema de NG-PON2 es muy sensible a las variaciones de longitudes de onda por haber una diferencia de menos de 1 nm entre las lambdas de trabajo. Además, **es muy sensible a pérdidas de tráfico por errores de bit a atenuaciones altas** debido al gran ancho de banda empleado.
- **Se debe analizar y homologar el elemento CEx y el WM para el diseño de la red ODN**. Los balances ópticos son de 29 dB según el estándar y así se ha demostrado en la demo.

- Los máximos observados durante la demo son parecidos a los expuestos por el estándar, destacando que con **FEC activado, la eficiencia encontrada fue de 86% aproximadamente**, es decir, 8.6 Gbps de 10 Gbps nominales.
- **La convivencia con distintas tecnologías está demostrada** con lo que se confirma una de las máximas del estándar.
- Una de las vías de trabajo a futuro es conseguir **analizar la trama de XGEM y la capa PLOAM** para confirmar que las ONTs se sincronizan y nivelan la potencia y el retardo como marca el estándar. En la demo no se pudo ver, pero la opción de analizar este aspecto daría un primer paso hacia la interoperabilidad de equipos de distintos fabricantes para abaratar costes y aumentar la competencia.

El siguiente apartado se expondrá una posible solución para un despliegue comercial a pesar de que la disponibilidad del equipamiento es escasa y los costes son altos, pero para los suministradores, NG-PON2 será la tecnología sobre sistemas PON más importante en el mercado dentro de unos años.

4.4 Visión de negocio y del mercado del NG-PON2

La aparición del XGS-PON supone como se ha comentado, una respuesta inmediata a la necesidad de simetría y mayor capacidad, en la Red de Acceso PON con una tecnología que está aún en desarrollo pero que emplea aspectos técnicos y tecnológicos de otros estándares para formar el G.9807.1 que se ha descrito en el apartado 4.2. Sin embargo, como se muestra a continuación en un gráfico a nivel mundial donde se observan los movimientos de los operadores más importantes en cuanto la mejora de sus redes PON, el XGS-PON está todavía en estudio o fase de demo, mientras que el XG-PON1 ha sido adoptado por ahora como una solución de emergencia.

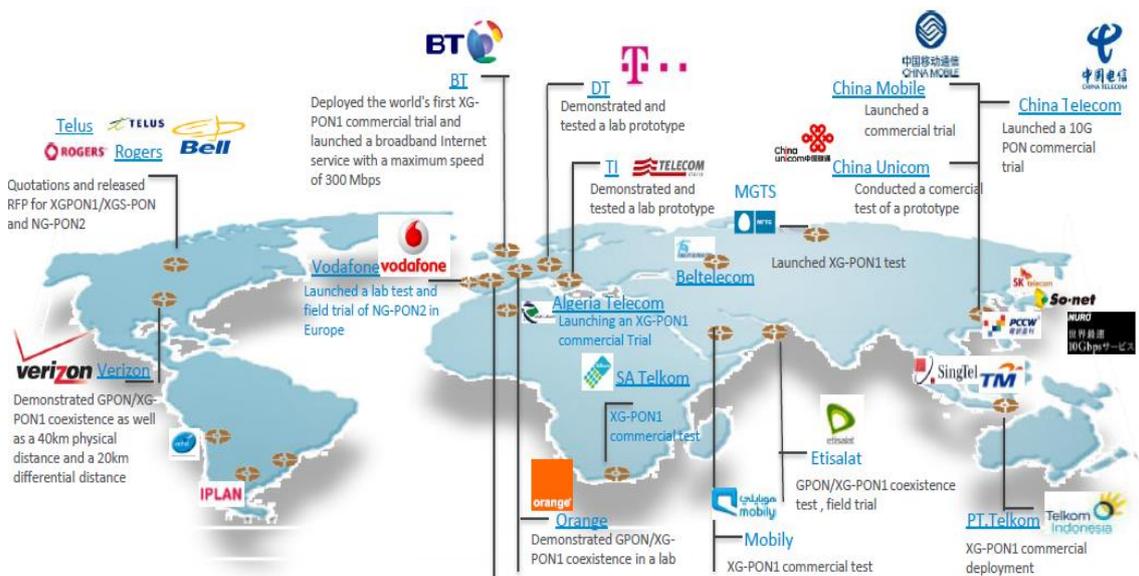


Figura 120 Marco Mundial de despliegues de nuevas tecnologías PON 2014

Ya se comentó que las longitudes de onda de XGS-PON son las mismas que las de XG-PON1, por tanto la existencia de este último queda relegada a zonas aisladas y donde no se instale el XGS-PON. La opción de adoptar el XG-PON1 respondía a necesidades de mercado por los anchos de banda, pero al no ser la solución ideal para la simetría, el XGS-PON poco a poco le irá “comiendo” el terreno y el dibujo en unos años será otro.

Pero esta tecnología de XGS-PON no deja de ser un puente entre el GPON y la verdadera evolución de NG-PON2. Al igual que ocurre en otros mercados que miran al cliente y crecen respondiendo a sus necesidades y sus características, las Redes de Acceso y sus tecnologías también van asociadas a una evolución marcada por el cliente. XGS-PON responde en un primer momento a esa necesidad donde, a nivel lógico y con algoritmos de QoS, se pueden diferenciar clientes y servicios dado el gran ancho de banda disponible de forma simétrica. Sin embargo, en unos años se quedará algo limitado en prestaciones. **NG-PON2 con sus 40 Gbps simétricos** con cuatro lambdas y posibilidad de evolucionar además de permitir, como se ha comprobado en el apartado anterior, una convivencia con las tecnologías *PON legacy*, **es la solución a futuro que miran los operadores y suministradores.**

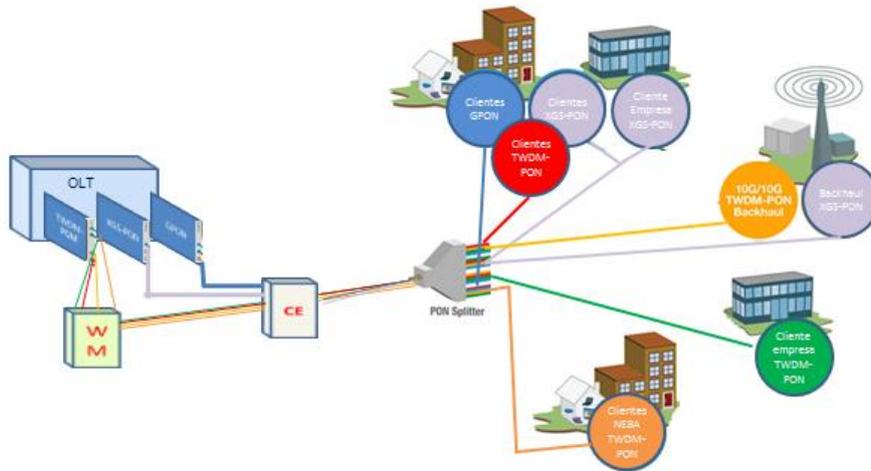


Figura 121 Posible escenario de despliegue para convivencia de Sistemas PON

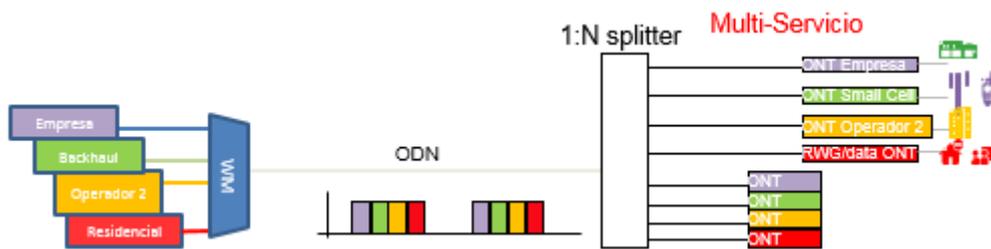


Figura 122 Posible escenario para solo NG-PON2 con varios servicios y operadores

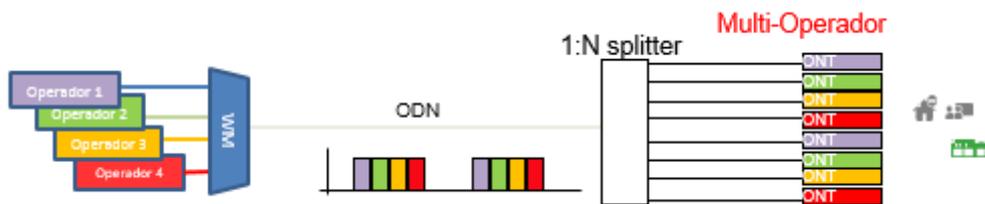


Figura 123 Posible escenario para solo NG-PON2 para varios operadores sobre misma ODN

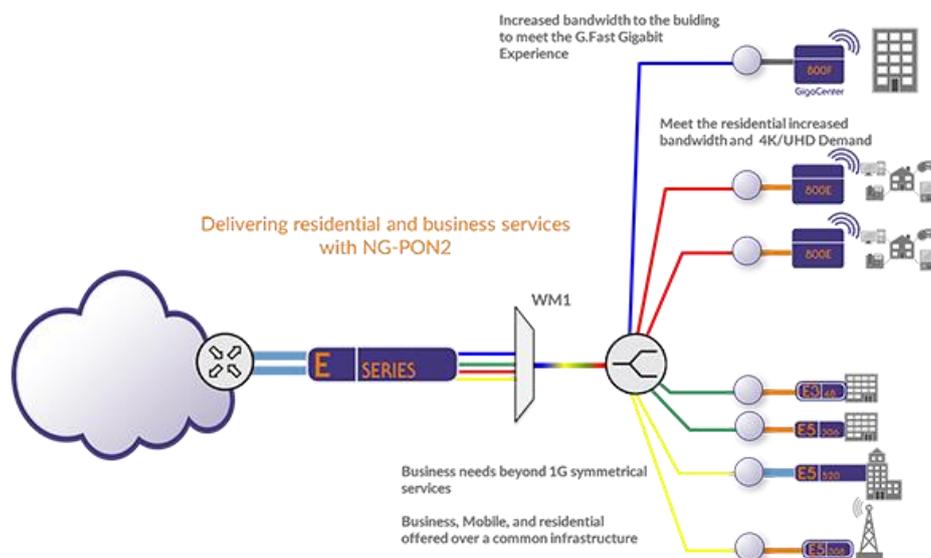


Figura 124 Propuesta de servicios sobre NG-PON2 con equipamiento de www.calix.com

De las dos posibilidades de tecnología NG-PON2 expuestas en el presente Trabajo, la que parece más realista y que puede “reinar” en un futuro es la de TWDM-PON debido a la complejidad electrónica y de gestión que tiene identificar a cada ONT por longitud de onda como hace el PtP-WDM. Con cuatro lambdas de 10 Gbps cada una y unas distancias similares a GPON e incluso con mayor posibilidad de splitting, los operadores pueden ofrecer a grupos de clientes una sola lambda de trabajo. Para ello es necesario que las ONTs potencialmente sean *colorless* e independientemente de la configuración empleada (vertical, horizontal o integrada como se vio en el apartado 4.1), **los operadores podrían ofrecer la siguiente distribución:**

- **Lambda 1 para clientes residenciales** ofreciendo la posibilidad de anchos de banda simétricos de 300 o 500 Mbps con bajas latencias y compitiendo en QoS con clientes residenciales iguales. Incluso ofrecer contenidos de 4K de TV de 25 Mbps.
- **Lambda 2 para clientes de empresa** donde se puedan ofrecer soluciones con ONTs de empresa con varios puertos Ethernet, conectar switches, etc. Siempre con la posibilidad de trabajar con 10 Gbps y contando que todos los clientes tengan la misma QoS para que no haya pérdidas significativas entre clientes de empresa, residenciales u otros operadores, como sí ocurriría con el GPON o con el XGS-PON.
- **Lambda 3 para backhaul móvil** donde se puedan llevar tasas de 150 o 300 Mbps para LTE-Advanced o dar conectividad a ONT tipo CBU (*Cellular Backhaul Unit*) para responder a las necesidades que saldrán con el 5G y/o Internet de las Cosas.
- **Lambda 4 para operadores indirectos** para darles 10 Gbps y cobrar por tasa de tráfico dada o por volumen de datos.

La red FTTH con sistema NG-PON2 podría ser la red de transporte perfecta para llevar la cantidad de tráfico que deberán soportar las redes de acceso para IoT o Internet de las Cosas. Con una única lambda dedicada, se podrían dar hasta 10 Gbps para ser red de transporte de este avance en el mundo de las telecomunicaciones sin penalizar otro tipo de servicios o de tráfico.

- **La disponibilidad de los equipos** → La tecnología en forma precomercial y aún no muy madura está disponible como se vio en el apartado anterior con la demo realizada si se toma como ejemplo que las ONTs no eran aún “colorless”. Los ajustes en el diseño de la opto-electrónica y el uso de unos componentes u otros para los equipos está evolucionando constantemente y pronto irán disminuyendo los precios. A día de hoy, distintos fabricantes han ido respondiendo a estas necesidades y han expresado su deseo de evolucionar de tal manera que de forma comercial se tiene el siguiente marco temporal:

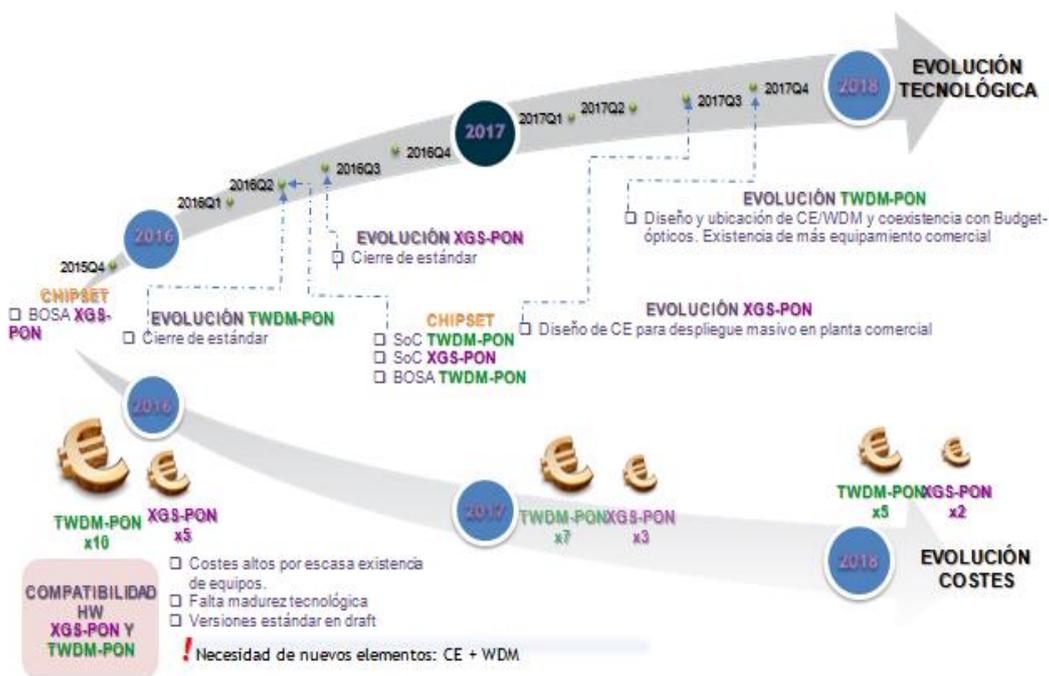


Figura 126 Evolución costes – disponibilidad equipos XGS-PON y NG-PON2

Como se puede observar, hay partes del equipamiento que están disponibles comercialmente que incluso se han probado en la demo. Pero otras no tanto y además son susceptibles de mejoras por el empleo de distintos componentes (BOSA, se refiere al componente que permite la conversión de óptico a eléctrico y que a altas velocidades puede dar problemas de diseño en una ONT [57]) o por decisiones de diseño (láseres + WM integrados o no en un XFP, por ejemplo) o soluciones integradas en la electrónica como el SoC que ya se comentó en el capítulo anterior para XGS-PON. Tampoco se tienen versiones estables y comerciales de ONTs para clientes residenciales ni los routers de los

clientes quizás estén capacitados para trabajar a 1 Gbps simétrico con varios servicios y varios o muchos equipos conectados a ello. Por tanto, la disponibilidad es un factor a tener en cuenta.

NG-PON2	FABRICANTES		
	HUAWEI	ZTE	NOKIA
OLT	MA5800	ZXA10 C300	7360 ISAM FX
Tarjeta PON	No encontrado modelo comercial	comercial 2020	No encontrado modelo comercial
XFP	No encontrado modelo	No encontrado modelo	No encontrado modelo
ONT residencial	No encontrado modelo	prototipo para 2017?	comercial para 2017?
ONT empresa (ONU)	MA5821 ---- disponible comercial 2017?	prototipo 2017? comercial 2020	Prototipo 2016 = TW-240GX-A comercial 2017??
CEx	No encontrado modelo	No encontrado modelo	No encontrado modelo
WM	No encontrado modelo	No encontrado modelo	No encontrado modelo

Tabla 45 Disponibilidad equipamiento NG-PON2 suministradores en España

Los tres fabricantes que actualmente despliegan equipamiento GPON en los principales operadores, Huawei [36], Nokia [37] y ZTE [35] también apuestan por las nuevas tecnologías aunque con distintas informaciones sobre disponibilidad de equipos comerciales. No se ha podido encontrar una información más detallada, pero los tres establecen el chasis (OLT) donde se montarán las tarjetas y los láseres. Algunos de ellos establecen prototipos para estos años como demuestra la aparición de algunos nombres para ONTs de empresa (o también ONUs), que han servido para realizar demostraciones en distintos operadores de distintos países, pero de forma comercial con una reducción de costes como la analizada en la *Figura 126*, quizás el más cercano sea Nokia de la mano de Alcatel-Lucent (comprada recientemente por la primera). En cualquier caso, se estima que para 2020 la competencia tendrá distintas soluciones comerciales de bajo coste para NG-PON2.

- **Los altos costes del NG-PON2** → Siguiendo con la *Figura 126*, se puede comprobar que poco a poco los costes se estiman que vayan bajando. Las necesidades de esta tecnología que aportará tanto en ancho de banda, distintas lambdas o mayor capacidad de splitting, en zonas como Asia o USA, pueden ser determinantes para que los costes bajen aún más si los fabricantes observan una demandada que justifique una pronta evolución.
- **El diseño de los componentes equipos** → Uno de los motivos para los altos costes que por ahora implica un despliegue de NG-PON2 y la escasa disponibilidad de los equipos es el diseño de los mismos. Los fabricantes aún siguen trabajando en abaratar costes y en conseguir diseños más integrados (SoC, *System-on-a-Chip* que ya se ha comentado) para poder dar respuestas a demandas en función de servicios, costes asociados, instalación, consumo, integración de láseres y su disipación de calor, etc. El hecho de usar unos sistemas de filtros ópticos u otros, integrar el CEx con el WM, o integrar el WM en los propios XFP que se instalan en las OLTs son algunos de los movimientos que pueden determinar el éxito o no de una solución.

- **Cambios en la planificación de despliegue** → Tras establecer un diseño de equipamiento que se traduzca en un modelo comercial (casos de negocio para distintos clientes), los fabricantes juntos con los operadores deben hacer frente al cambio en la planificación de despliegue y en la instalación. Especificar el funcionamiento y tamaño de los equipos, tipos de los conectores para las instalaciones existentes y definir correctamente el balance de potencias de una ODN desplegada actualmente, son factores a tener en cuenta por parte de los operadores que deben exigir a un fabricante para que su equipamiento llegue a planta y se contrate. Los fabricantes podrán adecuar sus soluciones a esos requisitos, que forman parte de cualquier proceso de compra de equipamientos, y esas soluciones darán con una solución que deberá integrarse en el día a día del operador.

Por ejemplo, la instalación del CEx y el WM. Desde el presente Trabajo se recomienda llevar la instalación “enrackada” de los CEx lo más cerca posible de los repartidos de tal forma que a éste le llegue solamente una fibra resultado de convivencia de una salida del WM con NG-PON2, GPON e incluso XGS-PON. En caso de tener OLTs con varias tarjetas de distintas tecnologías, como se observa en la *Figura 121*, sólo los elementos WM deberían estar enrackados en el mismo sitio que la OLT y el CEx estaría antes del repartidor hacia la salida a la calle, de esta forma se reconocería más fácilmente el proceder de las mismas, ya que habrá fibras hacia la ODN donde habrá convivencia y donde no.

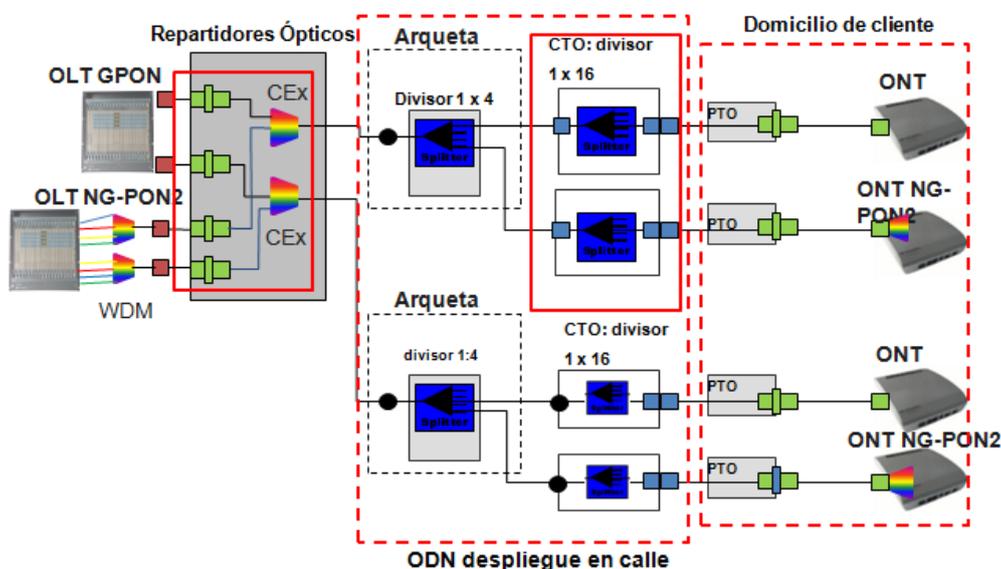


Figura 127 Esquema de conexiones ópticas con repartidos ópticos con CEx y WDM separados

Otra opción, como se ha enunciado en el apartado 4.3 es integrar CEx y WM en el mismo equipo con lo que se reduce el espacio en repartidores (en vez de dos equipos, sólo se emplea uno) y se escala en función del crecimiento de

tarjetas o puertos PON dedicados también a NG-PON2, pero se aumenta el número de fibras tiradas o instaladas en la central entre repartidores y se dificulta los cambios de instalación al cambiar tarjetas de OLTs a otras o instalar nuevas, ya que se obliga a ser eficiente en las conexiones pues se dispone en esos equipos de entradas de NG-PON2, GPON o incluso XGS-PON.

En cualquier caso, en el diseño de los equipos dependiendo de la longitud de onda, las pérdidas de inserción tendrán un valor u otro que quizás difieran un menos de 1 dB de pérdidas, pero habrá que tener en cuenta el peor valor de ellos. Los conectores deberán ser los empleados en planta actual, normalmente de SC/PC o SC/APC [58] que tienen pocas pérdidas como se ve en la anterior figura donde los conectores verdes indican SC/APC, que son angulados y de bajas pérdidas.

Al igual que ocurría con el diseño de una red con XGS-PON y GPON, para la integración del NG-PON2, el CEx deberá cumplir unos parámetros acordados y enunciados por el operador. Las características ya mencionadas como aislamiento, pérdidas de inserción, directividad o pérdidas de retorno deberán ser lo suficientemente capaces para que no afecte la integración de hasta tres tecnologías (cuatro si se cuenta el OTDR para supervisión de la red de fibra). En este punto, aunque no se tienen valores comerciales algunos fabricantes ofrecen equipos que permiten unas tasas de 1.2 dB de pérdidas de inserción y valores de aislamiento de 30 dB, pudiéndose considerar suficientes hasta que un entorno de laboratorio y posterior prueba piloto determine su viabilidad y funcionalidad comercial.

- **Evolución de las otras redes que componen un servicio** → A medida que nuevos servicios o aplicaciones aparecen, a los clientes les surge la necesidad de usarlos cuando antes ni siquiera existían. Eso provoca que a los anchos de banda ya empleados para servicios tradicionales, se tenga que aumentar la capacidad de la red para absorber ese tráfico. Ha ocurrido con las redes sociales, con servicios como Youtube, actualmente con Netflix y seguirá pasando a medida que avancen IoT, servicios Cloud, gaming, seguridad, etc. Todo ello hará que los anchos de banda usados para conectividad desde cualquier dispositivo aumenten y para ello es necesario que no sólo las Redes de Acceso aumenten su capacidad, sino también las otras redes que comprenden un sistema de telecomunicación como las Redes de Agregación, Redes IP, Redes de Transporte, por poner algunos ejemplos.

El que se aumente la capacidad hasta 40 Gbps por puerto PON o por tarjeta de puertos PON (si no hay XFP con todo integrado) exigirán que las OLTs tengan tarjetas de conexión con la Red de Agregación con puertos de 40 o de 100 Gbps y con ello, se deberá hacer un upgrade tanto físico (cambio de puertos) como de capacidad y de diseño de las otras redes. Desde este 2015 se están viendo enlaces cada vez con mayor exigencia de ancho de banda en tramos de red cada vez más arriba en la jerarquía de redes donde se agregan los tráficos de provincias españolas enteras, por ese motivo, tanto la evolución de la Redes de Acceso como las demás deben ir de la mano y hacerse de una forma progresiva por el impacto en los costes añadidos que ello supone. La planificación de una Red de Acceso o de un servicio sin más, debe tener eco en otras redes y es obligación del operador el tenerlas en cuenta para su estimación de costes total.

Todos estos aspectos deben ser tenidos en cuenta por el operador que apueste por NG-PON2 y seguro que todos lo harán. Puede que no sea este 2016 o el 2017, pero en unos años las empresas gozarán de conexiones ultrarrápidas y simétricas con una distinción física respecto a otros servicios y clientes y de anchos de banda asegurados para permitir a ciertos servicios o calidades un mínimo ancho de banda de uso en caso de congestión.

Los clientes residenciales sólo competirán entre sí. Los operadores podrán contratar longitudes de onda para acceder a clientes y con esto la CNMC tendrá que aprobar una regulación clara, replicando prácticamente el modelo de reparto del espectro para ondas radio para comunicaciones inalámbricas. Y pronto veremos cómo cada vez más, los operadores emplearán sus despliegues de fibra para llevar servicios y señales de otras redes más cerca del usuario como el backhaul móvil o el backhaul de 5G, Internet de las Cosas.

El futuro llama a la puerta del mercado español y hay tiempo para una correcta planificación y despliegue para ir amortizando costes y ser el exponente de la evolución en España para generar una marca propia dentro de las Redes de Acceso FTTH que explote las características de las distintas tecnologías propuestas en este documento, así como las demostraciones y los distintos análisis que perfectamente pueden servir a operadores para lanzarse al XGS-PON y posteriormente al NG-PON2.

Capítulo 5. Conclusiones y Futura Líneas de Trabajo

Las conclusiones que se han extraído de cada capítulo y que sirven para formar la opinión final del autor son:

- **El GPON es la solución de presente** para abordar las necesidades de la banda ancha en España por sus muchas ventajas como por ejemplo “identificadores” lógicos que permiten diferenciar y hacer QoS entre distintos servicios, mayor capacidad de ancho de banda por servicios y clientes que las tecnologías xDSL, además de su mayor extensión respecto a tecnologías como las Redes de Acceso sobre Bucle de Cobre. Sin embargo, ya se deja ver un problema de capacidad (en cuanto a máximos anchos de banda y gestión de recursos como los anchos de banda asegurados) y de simetría en los anchos de banda.
- **Se plantea una solución como XGS-PON que emplea una longitud de onda distinta que GPON sobre el mismo despliegue de fibra óptica, pero con 10 Gbps simétricos.** Así, se podrá aportar mayor capacidad y perfiles de ancho de banda simétricos para responder a las necesidades del mercado actuales y a las futuras, que impondrán servicios como Cloud, Internet de las Cosas, auge de las conectividades para clientes de empresa, backhaul de 4G o 5G porque tal y como destacó Mark Barnett, responsable Nokia Mobile Networks Oceania [59]: *“Necesitas mucha fibra óptica, la necesitas de verdad, redes fijas de alta capacidad. El 5G es más que una red inalámbrica. Es una red inalámbrica y fija. Es el futuro de la convergencia de las redes”*. XGS-PON y NG-PON2 pueden cubrir esa necesidad de alta capacidad a corto – medio plazo.
- Se debe diseñar y analizar el elemento pasivo que permite la multiplexación de las longitudes de las distintas tecnologías si se quiere un escenario de convivencia de tecnologías PON con despliegues ya realizados para que los balances ópticos expuestos en los distintos estándares se cumplan para asegurar una buena experiencia de usuario.
- En GPON, además de la simetría, los problemas de limitación en la capacidad de la tecnología pueden venir en la repartición de los recursos asegurados. De esta forma, **migrar a XGS-PON y posteriormente a NG-PON2 permitirá una nueva estrategia comercial y de capacidad** en función de recursos asegurados no sólo de máximos anchos de banda como mandan ahora las ofertas comerciales.
- En los resultados expuestos sobre la demo de **XGS-PON se muestran prácticamente los 10 Gbps simétricos sin FEC y una eficiencia de 85-86%**

- con FEC activado** que es necesario para trabajar con estos anchos de banda a altas atenuaciones provocadas entre otras cosas, por la distancia de varios km que plantea un despliegue comercial actual.
- **Los costes de XGS-PON a día de hoy multiplican por cuatro el de una instalación con equipamiento y uso del GPON.** Poco a poco irán bajando pues la tecnología nace de usar la trama de NG-PON2 (diseñada y publicada en 2015) y la tecnología óptica del estándar 802.3bk, disponible desde hace unos años.
 - **Un despliegue en forma de experiencia piloto es la mejor manera de conocer las nuevas tecnologías en Sistemas PON** y exponer las necesidades de un cambio a los clientes. Es decir, permite generar la necesidad, la demanda. Es aconsejable plantear una diferenciación entre los clientes con equipamientos como ONTs de empresa y residenciales para responder a necesidades distintas de mercado.
 - XGS-PON sigue teniendo la “limitación” de usar solo una lambda que da como máximo 10 Gbps. Para obtener más capacidad, **la tecnología NG-PON2 plantea la posibilidad de emplear más de una lambda de 10 Gbps simétricos para hacer un total de 40 Gbps** (evolucionable a futuro por usar más lambdas).
 - **Usar varias lambdas permite aumentar la capacidad y diferenciar por tipo de cliente o de servicio o de operador si así lo exige el organismo regulador.** Es la respuesta definitiva para dinamizar el mercado español y dar respuesta a todas las necesidades que surjan durante estos años en cuanto al ancho de banda de aplicaciones, servicios u ofertas se refiere.
 - **El principal inconveniente de NG-PON2 es la disponibilidad de los equipos y por extensión el coste.** Aún quedan unos años para tener un abanico de productos que generen competencia y distintos escenarios a los operadores para la elección de un fabricante u otro. Así también podrían bajar los costes que en la actualidad son de 10 veces el coste por homologar, instalar y gestionar un cliente de GPON.
 - Además, **se deben diseñar y replantear las directrices de instalación y gestión de espacios en las centrales** para instalar el elemento que multiplexa y demultiplexa (WM) las longitudes de onda de uso del NG-PON2 y el elemento CEx que permite la convivencia de GPON, XGS-PON, Vídeo overlay y OTDR sobre la misma fibra que llega al domicilio de los clientes.
 - **Se aboga por una experiencia piloto** en zonas metropolitanas donde en unos años se **puedan dar servicio de NG-PON2** sin que exista problemas de congestión en las distintas redes del operador ni en los propios servicios de los clientes. **En 2018 se estima que haya bajado el coste del cliente de NG-PON2 a la mitad** y haya disponibilidad de equipos de cliente, tarjetas, módulos ópticos y nuevos enlaces de mayor capacidad en la red para dotar al mercado español de la red óptica del futuro.

A título personal y dado el estudio realizado, el autor del presente Trabajo expone que la siguiente evolución en los Sistemas PON en términos de costes y de disponibilidad de equipamiento será el XGS-PON. Así mismo entiende que los nuevos clientes a los que hay que fijar soluciones adecuadas a su importancia y volumen de ingresos serán las empresas. XGS-PON y por extensión, NG-PON2 darán la posibilidad de facilitar grandes anchos de banda tanto máximos como asegurados, y simetrías ya de por sí planteadas tecnológicamente no como ahora se pretende hacer con GPON (tecnología asimétrica como se ha explicado).

Las empresas serán los verdaderos beneficiados por las siguientes evoluciones de los Sistemas PON y donde los operadores deberán hacer un esfuerzo por dar soluciones personalizadas en cuanto a despliegue, gestión y diseño de sus redes, sin olvidar la capacidad de la que muchas de ellas demandarán cada vez más y con mejores QoS frente a los residenciales y con distintos valores de anchos de banda de asegurados en función de su negocio y de su consumo. Los pagos que hacen las empresas son mucho mayores que los residenciales y XGS-PON con sus ONTs de empresa y NG-PON2, posteriormente pueden ser el elemento que haga que estas tecnologías tengan éxito incluso antes de que lleguen los abaratamientos de los costes de un despliegue.

Los operadores siempre hacen comparación con el cliente residencial, pero las primeras amortizaciones de un despliegue vendrán con las empresas. Los servicios de Cloud y el Internet de las Cosas, tanto para empresas como residenciales, serán los servicios que dispararán el consumo de ancho de banda en el upstream y de ahí la urgencia de la simetría. Un despliegue piloto controlado en áreas con gran impacto mediático deberá ser el primer paso de todo operador para ganar la “batalla” de las bondades que deparan estas evoluciones. Cuando el coste lo permita, ya a finales de 2016, más en 2017, la migración de clientes residenciales a XGS-PON deberá hacerse de forma progresiva siempre seguido de una evolución en las redes que, por jerarquía están por encima de las de Acceso, para que el coste esté dividido en distintas áreas y no haya cuellos de botella. Desde el presente Trabajo, el autor aboga por estos pasos para redefinir los accesos FTTH y responder a los problemas que todos los operadores se encontrarán (se encuentran) en un futuro muy cercano

De esta forma, surgen las distintas vías de trabajo que para futuros proyectos de investigación pueden ser objeto de estudio:

- **Diseño y programación de nuevos test de velocidad** para conexiones fijas y por wifi para soportar 500 Mbps simétricos o 1 Gbps simétrico.

-
- **Diseño de un despliegue de red de fibra óptica en central** para mejorar la eficiencia de espacio y de consumo de los equipos en convivencia de distintas tecnologías.
 - **Diseño de servicios** sobre FTTH para backhaul móvil, 5G, Internet de las Cosas.
 - **Análisis y pruebas de laboratorio de nuevos componentes** y elementos ópticos como los futuros WM o CEx que se desarrollarán para abaratar costes y despliegues.
 - **Análisis de las distintas evoluciones de los estándares G.989 y el futuro de XGS-PON.**
 - **Estudio de algoritmos de QoS** sobre distintos servicios con una capacidad de 10 Gbps.
 - **Análisis estadístico del impacto de las nuevas tecnologías** en el consumo de ancho de banda y de datos por parte de los clientes en las redes de transporte y de core.
 - Análisis de algoritmos para la **gestión de la asignación de los anchos de banda de asegurados** de upstream mediante TDMA sobre sistemas PON.
 - Líneas de trabajo para la adopción de **nuevas técnicas de proceso digital de la señal** para mejorar la recepción y de nuevas técnicas de codificación.

Capítulo 6. Pliego de Condiciones

El presente Trabajo de Fin de Máster “La Llegada de las Nuevas Tecnologías sobre Redes PON al Acceso Fijo Español” se ha realizado en el Área de Tecnologías de Telecomunicación/Gestión Tecnológica de Proyectos de Telecomunicación de la Universidad Europea de Madrid.

El objetivo principal del Trabajo ha sido estudiar las nuevas tecnologías sobre Sistemas PON que los organismos internacionales y los fabricantes están proponiendo para evolucionar las Redes de Acceso de los operadores. En este Trabajo se analiza el impacto y mejoras que puede suponer su llegada en el mercado español.

La directora de este Trabajo ha sido la Doctora Doña Silvia Abad Valtierra, Directora del Máster en Ingeniería de Telecomunicación de la Universidad Europea de Madrid.

Esta línea de investigación así como toda la documentación desarrollada están amparadas en el siguiente Pliego de Condiciones:

1. La propiedad intelectual de los estudios realizados en el presente Trabajo pertenece por entero a su autor Don Miguel Ángel González de Paz que siguiendo las directrices marcadas por la Universidad Europea de Madrid (a partir de ahora, la Universidad), autorizará a dicha entidad la consulta, difusión y/o exposición pública del trabajo sin ánimo de lucro y sin menoscabo de sus derechos de autor, así como de los aspectos confidenciales que se expresan a lo largo del documento.
2. La Universidad se reserva el derecho de utilización total o parcial del presente Trabajo, bien para su publicación o para su uso en trabajos o proyectos posteriores.
3. En cualquier tipo de reproducción, ya sea para su uso particular de la Universidad o para cualquier otra aplicación, se indicará la procedencia, mostrando de manera explícita el nombre del Trabajo, el del ingeniero Ponente y el de la Universidad.

-
4. Si el proceso pasa la etapa de desarrollo, cualquier modificación que se realice en él deberá ser notificada al Ingeniero Ponente del Trabajo y a la directora, la Dra. Doña Silvia Abad Valtierra; posteriormente, la Universidad decidirá o no la modificación propuesta.

 5. En el caso de no aceptar dicha modificación, la Universidad declina toda responsabilidad derivada de la aplicación de la misma.

 6. La Universidad tendrá prioridad respecto a otros solicitantes en la elaboración de Proyectos o Trabajos Auxiliares que fuesen necesarios para la posible aplicación industrial que pudiera derivarse del presente Trabajo, siempre y cuando no renuncie de manera explícita a este derecho. En este caso, deberá autorizar expresamente los proyectos o trabajos presentados por otros.

Capítulo 7. Presupuesto

En este capítulo se muestra un presupuesto estimado de todo lo que ha llevado realizar este Trabajo de Fin de Máster. Algunos de los equipos empleados para el montaje de las demostraciones y pruebas de laboratorio ni siquiera tienen correspondencia comercial, por lo que se ha estimado un coste por alquiler de equipamiento por parte del fabricante, de montaje y de soporte para la realización del mismo. Además, se han contabilizado las horas de una figura llamada Secretario quien se encargaría de redactar este documento, un Ingeniero de Telecomunicaciones para realizar las pruebas y un Técnico de laboratorio para soporte del mismo. En cierta manera dos de esas figuras recaen en la persona que está realizando este Trabajo de Fin de Máster, pero de esta forma se destacan las horas de redacción del documento y las horas de pruebas en laboratorio.

7.1.1 Precios unitarios

A continuación, se muestra una tabla con los precios de los equipos empleados para la realización de este Trabajo y además, el precio por horas de las figuras expuestas para dicha realización. En el siguiente apartado se valorará el precio final con el cómputo de horas de cada demostración en laboratorio y de redacción del presente documento.

Referencia dispositivo	Fabricante	Descripción	Precio Unidad	Unidades	Precio Total (Euros)
---	---	Demostración de XGS-PON	2000 Euros / Día	6	12000
---	---	Demostración de NG-PON2	4000 Euros / Día	5	20000
<i>Optixia XM12</i>	Ayscom	Generador de tráfico IXIA	3000 Euros/ Día	11	33000
Pavilion g6	HP	PC para redacción de documento y pruebas de velocidad	600	1	600
ONT I-240-GT Router VG-8050 Desco	Nokia, Comtrend y Arris	Equipamiento de cliente GPON comercial. ONT + Router + desco	100	1	100

HGW-2501GN-R2	Mitrastar	Router para prueba piloto de XGS-PON	40	2	80
FWLT-A	Nokia	Tarjeta Puertos XGS-PON para piloto con XFP incluido	15000	1	15000
933HD	Samsung	TV para piloto XGS-PON	100	2	200
Domo 2	Telefónica	Teléfono Analógico para piloto XGS-PON	15	2	30
----	---	Cable Ethernet 5e	2	2	4
----	---	Latiguillo de fibra óptica conectores APC	5	3	15
TW-240GX-A	Nokia	ONT de XGS-PON	300	2	600
----	---	Enfrentadores fibra SC/APC	1	2	2
VIP1113	Arris	Descodificador Movistar TV	2	60	120
----	---	Cable HDMI conexión descodificador - TV	15	2	30

Tabla 46 Equipamiento empleado y costes

NOTA 1: Los fabricantes de las demostraciones, por exigencias de confidencialidad no se pueden indicar como ya se ha comentado a lo largo del documento. Además, para la estimación del coste de la tarjeta empleada para el piloto XGS-PON y de las ONTs empleadas, se estiman esos importes, pero no se tiene oferta comercial formal de ninguno de estos productos.

NOTA 2: Para la realización de la demostración de XGS-PON se contó con la ayuda de personal de soporte del fabricante que se contará como Técnico de laboratorio. El equipamiento total se ha reflejado en el apartado 3.3 del presente documento y se ha

valorado el importe estimado del alquiler para las pruebas donde sólo se ha contado el equipamiento aportado por el fabricante, así como la instalación y alimentación de los equipos.

NOTA 3: Para la realización de la demostración de NG-PON2 se contó con la ayuda de personal de soporte del fabricante que se contará como Técnico de laboratorio. El equipamiento total se ha reflejado en el apartado 3.3 del presente documento y se ha valorado el importe estimado del alquiler para las pruebas donde sólo se ha contado el equipamiento aportado por el fabricante así como la instalación y alimentación de los equipos.

Trabajador	Salario Mensual Bruto (Euros)
Ingeniero de Telecomunicaciones	3400
Técnico de laboratorio	2400
Secretario	2000

Tabla 47 Salario Mensual por trabajador

Trabajador	Euros Brutos/Hora
Ingeniero de Telecomunicaciones	21.25
Técnico de laboratorio	15
Secretario	12.5

Tabla 48 Salario por hora de cada trabajador

NOTA 4: Se estima que se trabajan un total de 40 semanales, llegando a las 160 horas mensuales. El resultado de Euros/Hora es el sueldo mensual dividido por las horas de trabajo al mes.

7.1.2 Presupuesto Total

A continuación, se muestran los costes totales para la elaboración de este Trabajo de Fin de Máster en función de las actividades realizadas.

Tarea	Trabajador	Horas	Coste Total Euros
Montaje en laboratorio XGS-PON	Ingeniero Técnico de laboratorio	10	212.5 150
Montaje en laboratorio NG-PON2	Ingeniero Técnico de laboratorio	16	340 240
Alimentación equipos y conexionado de fibras ópticas	Técnico de laboratorio	4	60
Medidas demo XGS-PON	Ingeniero	50	1062.5
Medidas demo NG-PON2	Ingeniero	42	892.5
Montaje Piloto XGS-PON	Ingeniero	16	340
Pruebas Piloto XGS-PON	Ingeniero	8	170
Documentación de pruebas y tecnologías	Ingeniero	30	637.5
Preparación y Redacción Documento	Secretario	150	1875

Tabla 49 Actividades y coste personal

Coste	Presupuesto Euros
Costes por material	81781
Costes por personal	5980
TOTAL	87761

Tabla 50 Presupuesto y coste total TFM

El presupuesto total estimado de este Trabajo de Fin de Máster es de: **87761** Euros, es decir, *ochenta y siete mil setecientos sesenta y un euros*.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR OF ITU (ITU-T). G.984.1: Redes ópticas pasivas con capacidad de Gigabits: Características generales. Intellectual Property rights in ITU-T [en línea]. Marzo 2008. Disponible en: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.984.1-200803-I/es>
- [2] TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR OF ITU (ITU-T). G.988. ONU management and control interface (OMCI) Specification. Intellectual Property rights in ITU-T [en línea]. Octubre 2012. Disponible en: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.988/es>
- [3] Oferta referencia ADAMO [En línea]: Fecha de consulta 27-Enero-2016. Disponible en <https://www.adamo.es/>
- [4] Análisis situación mundial de FTTH/FTTB de FTTHCouncil en diciembre de 2014 [en línea]. Fecha consultada 26-01-16. Disponible en: http://www.ftthcouncil.eu/documents/Reports/2015/Market_Data_December_2014.pdf
- [5] Especificaciones de Docsis por CableLabs [en línea]. Consultada en enero 2016. Disponible en: <http://www.cablelabs.com/specs/specification-search/?cat=docsisspecifications/>
- [6] ESPAÑA ES EL PAÍS MEJOR CONECTADO DE EUROPA Y LÍDER EN EL USO DEL SMARTPHONE Y SMART TV. Nota de prensa de Telefonica. Abril 2016. Disponible [en línea]: <https://www.telefonica.com/es/web/sala-de-prensa/-/espana-es-el-pais-mejor-conectado-de-europa-y-el-lider-en-uso-del-smartphone-y-la-smart-tv>
- [7] TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR OF ITU (ITU-T). G.984.3: Redes ópticas pasivas con capacidad de gigabits: Especificación de la capa de convergencia de transmisión. Intellectual Property rights in ITU-T [en línea]. Enero 2014 última edición. Disponible en: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.984.3-201401-I/es>
- [8] TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR OF ITU (ITU-T). G.652: Características de las fibras y cables ópticos monomodo. Última edición septiembre 2009. Disponible en línea en: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.652-200911-I/es>

- [9] TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR OF ITU (ITU-T). G.984.2: Redes ópticas pasivas con capacidad de gigabits: Especificación de la capa dependiente de los medios físicos. Intellectual Property rights in ITU-T [en línea]. Marzo 2003. Disponible en:
<https://www.itu.int/rec/T-REC-G.984.2/es>
- [10] TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR OF ITU (ITU-T). G.984.3: Redes ópticas pasivas con capacidad de gigabits: Especificación de la capa de convergencia de transmisión. Capítulo 13.1.1 Reed-Solomon Encoding. Intellectual Property rights in ITU-T [en línea]. Enero 2014 última edición. Disponible en:
<https://www.itu.int/rec/T-REC-G.984.3-201401-I/es>
- [11] Datos estadísticos de la CNMC en el sector Telecomunicaciones y Audiovisual. Disponible en línea en: <http://data.cnmc.es>
- [12] Comparativa ADSL y Fibra. Febrero 2016. Publicada por ADSLZONE.NET estando disponible en línea en: <http://www.adslzone.net/comparativa.html>
- [13] ¿Cuáles son las ventajas de un router de doble banda? Artículo publicado por ThinkBig.com el 26 de noviembre de 2014. Disponible en:
<http://blogthinkbig.com/wifi-de-doble-banda/>
- [14] Oferta de Referencia del Nuevo Servicio Ethernet de Banda Ancha (NEBA). Texto consolidado con última edición publicada en julio de 2015 por la CNMC. Disponible en:
http://telecos.cnmc.es/documents/10138/4282698/150731_Texto+consolidado+NEBA+julio+2015.pdf/8cc21d4e-3852-4104-bdf5-a9304337fe9d
- [15] *INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS (IEEE)*. 802.1Q-2014-Bridges and Bridged Networks. Publicado desde 2012. Disponible en:
<http://www.ieee802.org/1/pages/802.1Q-2014.html>
- [16] Información Técnica equipamiento ANUE delay generator. Fabricante Spirent. Datos publicados y disponibles en línea en: <http://www.smarttechconsulting.com/Spirent-Anue-H-Series-Hawaii-Platform-Ethernet-Network-Emulator>
- [17] ¿Qué velocidad necesito contratar para mi conexión a Internet? David Valero para ADSLZONE.NET el 28 de enero de 2016. En línea. Disponible en:
<http://www.adslzone.net/2016/01/28/que-velocidad-necesito-contratar-para-mi-conexion-a-internet/>

- [18] Huawei SmartAX MA5600T. Portfolio y especificaciones de producto publicadas por netnordic.com. Disponible en línea en: <http://www.netnordic.com/dk/wp-content/uploads/2013/04/Huawei-MA5603.pdf>
- [19] Release Comercial Alcatel-Lucent 7302/7330. Portfolio y especificaciones de producto publicadas por netnordic.com. Disponible en línea en: http://www.netnordic.se/wp-content/uploads/2013/09/ISAM_7302_and_7330_AP1_.pdf
- [20] DSL FORUM, Architecture and Transport working group: Technical Report TR-101 Migration to Ethernet-Based DSL Agregation. Abril 2006. Disponible en línea en: <https://www.broadband-forum.org/technical/download/TR-101.pdf>
- [21] TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR OF ITU (ITU-T). G.989: Serie Estándar para Redes Ópticas Pasivas de 40 Gigabits. Intellectual Property rights in ITU-T [en línea]. En vigor última edición de Octubre 2015. Sitio web en (NO disponible, prepublicado): <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.989/es>
- [22] TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR OF ITU (ITU-T). G.987: Sistema de red óptica pasiva con capacidad de 10 Gigabit (XG-PON): Definiciones, abreviaturas y siglas. Intellectual Property rights in ITU-T [en línea]. En vigor última edición de Junio 2012. Disponible en: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.987/es>
- [23] *Telefónica retará a Vodafone con fibra a mil megas de velocidad*. Artículo publicado por Ignacio del Castillo en Expansión el 21 de septiembre de 2014. Disponible en línea: <http://www.expansion.com/2014/09/21/empresas/tmt/1411325909.html>
- [24] *INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS (IEEE)*. 802.3BK-Amendment 1: Physical Layer Specifications and Management Parameters for Extended Ethernet Passive Optical Networks. Publicado desde 2013. No Disponible excepto para usuarios permitidos. Sitio web: <http://www.ieee802.org/3/bk/>
- [25] XGS-PON STANDARD APPROVED. Artículo publicado por David Russell en Calix Community Blog. 10 de marzo de 2016. Disponible [en línea]: <https://community.calix.com/t5/Calix-Community-Blog/XGS-PON-Standard-Approved/ba-p/37098>
- [26] TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR OF ITU (ITU-T). J.185: Transmission equipment for transferring multi-channel televisión signals over optical acces networks by frequency modulation conversion. Intellectual Property rights in ITU-T [en línea]. En vigor última edición de Junio 2012. Disponible en: <https://www.itu.int/rec/T-REC-J.185-201206-l>

- [27]TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR OF ITU (ITU-T). J.186: Equipo de transmisión para señales de televisión multicanal en redes de acceso óptico mediante multiplexación de subportadora. Intellectual Property rights in ITU-T [en línea]. En vigor última edición de Junio 2008. Disponible en: <https://www.itu.int/rec/T-REC-J.186/es>
- [28]TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR OF ITU (ITU-T). G.9870.1: 10-Gigabit-capable symmetric passive optical network (XGS-PON). Intellectual Property rights in ITU-T [en línea]. En vigor desde febrero 2016. Disponible en: http://www.itu.int/itu-t/workprog/wp_item.aspx?isn=10591
- [29]BROADBAND FORUM: Technical Report TR-156 Using GPON Access in the context of TR-101. Diciembre 2008. Disponible en línea en: <https://www.broadband-forum.org/technical/download/TR-156.pdf>
- [30]INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS (IEEE). 802. Q-in-Q VLAN Tag Termination. Disponible gracias a CISCO. Sitio web: http://www.cisco.com/en/US/docs/ios/lanswitch/configuration/guide/lsw_ieee_802.1q.html
- [31]Jazztel y ZTE ready for 10 GPON comercial launch. Artículo – Nota de prensa publicado por ZTE el 24 de febrero de 2014. Disponible en línea: http://www.en.zte.com.cn/en/press_center/news/201402/t20140225_418446.html
- [32]NOTA DE PRENSA: La CNMC lanza una consulta pública sobre la regulación mayorista de los mercados de banda ancha. 19 de diciembre de 2014. [En línea]. Disponible en: <http://www.cnmc.es/CNMC/Prensa/TabId/254/ArtMID/6629/ArticleID/1044/La-CNMC-lanza-una-consulta-p250blica-sobre-la-regulaci243n-mayorista-de-los-mercados-de-banda-ancha.aspx>
- [33]McCOWAN, RYAN. NG-PON2 & XGS-PON Lowering the Cost of Consolidating Residential and Business Services. Sept 2015. Adtran USA. [En línea]. Disponible en: <http://www.webcaster4.com/Player/Material?uid=2305846&materialGuid=5f4478fb-d75f-4ef6-93f3-e25b67862c7a>
- [34]Fibrant, Calix Partner to Enable America’s First 10 Gigabit Connected City. Artículo publicado por Telecomdrive Bureau el 4 de septiembre de 2015 [en línea]. Disponible en: <http://telecomdrive.com/fibrant-calix-partner-to-enable-americas-first-10-gigabit-connected-city/>
- [35] ZTE ZXA10 C300. Características y especificaciones técnicas publicadas por Alibaba. Disponible en línea en: <http://chucheng.en.alibaba.com/product/60418992810->

[220199588/Large Capacity ZTE ZXA10 OLT C300 supports EPON or GPON Access in STOCK with BEST PRICE.html](http://www.zte.com/220199588/Large_Capacity_ZTE_ZXA10_OLT_C300_supports_EPON_or_GPON_Access_in_STOCK_with_BEST_PRICE.html)

- [36] Huawei SmartAX Series MA5800. Características y especificaciones técnicas publicadas por Huawei. Disponible en línea en: <http://e.huawei.com/en/products/fixed-network/access/olt/ma5800>
- [37] 7360 ISAM FX Products. Características y especificaciones técnicas publicadas por Alcatel-Lucent. Disponible en línea en: <https://www.alcatel-lucent.com/products/7360-isam-fx>
- [38] RAAFLAUB, Kurt. *Innovation That Matters: XGS-PON is here!*. Publicado por Adtran. 1 de marzo de 2016. Disponible en línea en: <https://www.adtran.com/index.php/blog/86-innovation-that-matters-xgs-pon-is-here>
- [39] Greg Bathrick of Calix Named Broadband Forum Fiber Access Networks Work Area Director. Nota de prensa de Calix, publicada el 14 de marzo de 2016. Disponible en línea en: <http://www.realwire.com/releases/Greg-Bathrick-of-Calix-Named-Broadband-Forum-Fiber-Access-Networks-Work-Area>
- [40] NG-PON Expert Products. Características y portfolio de productos de la empresa Tracespan. Disponible en línea en: <http://tracespan.com/portfolio-view/ng-pon-expert/>
- [41] VALERO, David. *La televisión de pago y la fibra aumentan los ingresos de las telecos tras 6 años cayendo*. Artículo publicado para la web ADSLZONE el 28 de abril de 2016. Disponible en línea en: <http://www.adslzone.net/2016/04/28/la-television-pago-la-fibra-aumentan-los-ingresos-las-telecos-tras-6-anos-cayendo/>
- [42] LAYEDRA ALBÁN, Julio Andrés. *Análisis y simulación de los efectos no lineales causados por el fenómeno de dispersión inelástico en la capa física en una red pon de nueva generación*. Capítulo 2.5. Universidad Politécnica Salesiana de Quito. Octubre 2014. Disponible en: <http://docplayer.es/10057607-Universidad-politecnica-salesiana-sede-quito.html>
- [43] LUO, Yuanqiu. EFFENBERGER, Frank. TWDM-PON: The solution of choice for NG-PON2. Comunicado publicado por Huawei. Disponible en: <http://www1.huawei.com/en/about-huawei/publications/communicate/hw-201329.htm>

- [44] PEETERS, Michael. *The sky is the limit*. Presentación sobre NG-PON2 realizada en febrero 2012 en el FTTH Council de Múnich. Disponible en: <http://www.slideshare.net/multiplex/active-technologies-the-sky-is-the-limit>
- [45] TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR OF ITU (ITU-T). G.989.2: 40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): Physical media dependent (PMD) layer specification. Intellectual Property rights in ITU-T [en línea]. En vigor diciembre 2014. Sitio web en (NO disponible, prepublicado): <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.989/es>
- [46] TON, D.; YOFFE, G. W.; HEANUE, J. F.; EMANUEL, M. A.; *2.5-Gb/s modulated widely tunable laser using an electro absorption modulated DFB array and MEMS selection*. IEEE Photonics Technology Letters (Volume:16 , Issue: 6). Junio 2004. Disponible su abstract en: http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=1300669&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D1300669
- [47] COPPOLA, Giuseppe; LODICE, Mario; SAFIOTTI, Nunzia. *Fiber Bragg grating sensor monitoring with thermally tuned Fabry-Perot cavity integrated in an all-silicon rib waveguide*. Optoelectronic Integration on Silicon II, 234 (14 Marzo, 2005). Disponible en línea: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=860083>
- [48] LEE, J.S.; CHUNG, Y.C.; SHIM, C.S. *Bandwidth optimization of a spectrum-sliced fiber amplifier light source using an angle-tuned Fabry-Perot filter and a double-stage structure*. IEEE Photonics Technology Letters (Volume:6 , Issue: 10). Agosto 2002 última version. Disponible su abstract en: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=329637>
- [49] LI, Yunchu; ZHANG, Lin; SONG, Muping; ZHANG, Bo; BEAUSOLEIL, Raymond. *Coupled-ring-resonator-based silicon modulator for enhanced performance*. 2008. Disponible en línea en: <https://www.macom.com/files/live/sites/ma/files/contributed/technology/Coupled%20Ring%20Resonator%20based%20Silicon%20Modulator%20for%20Enhanced%20Performance.pdf>
- [50] Liquid crystal tunable filter. Descripción disponible en Wikipedia. Disponible en línea en: https://en.wikipedia.org/wiki/Liquid_crystal_tunable_filter
- [51] HERON, Ron. PESOVIC, Ana. TWDM-PON: Taking Fiber to New Wavelengths. Publicación sobre TWDM-PON en Alcatel-Lucent. Abril 2014. Disponible en: <https://techzine.alcatel-lucent.com/twdm-pon-taking-fiber-new-wavelengths>

- [52]SHENGPING, Li. *Single-wavelength rates for 100G access*. Publicado en el Communicate 78 de Huawei en Marzo 2016. Disponible en línea en: <http://www.huawei.com/en/publications/communicate/78/single-wavelength-for-100g-access-en>
- [53]VEGA OLMOS, Juan José. Five-level polybinary signaling for 10 Gbps data transmission systems. Technical University of Denmark. Publicado en Optics Express en 2013. Disponible en línea en: http://orbit.dtu.dk/files/58167604/oe_21_17_20417.pdf
- [54]TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR OF ITU (ITU-T). G.989.1: 40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): General requirements. Intellectual Property rights in ITU-T [en línea]. En vigor marzo 2013. Sitio web en (NO disponible, prepublicado): <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.989/es>
- [55]TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR OF ITU (ITU-T). G.989.3: 40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): Transmission Convergence Layer Specification. Intellectual Property rights in ITU-T [en línea]. En vigor octubre 2015. Sitio web en (NO disponible, prepublicado): <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.989/es>
- [56]MUÑOZ, Ramón. *Bruselas autoriza a MasMovil la compra de activos de Orange*. Artículo publicado en EL PAIS el 19 de octubre de 2015. Disponible en línea: http://economia.elpais.com/economia/2015/10/19/actualidad/1445244918_715123.html
- [57]Especificaciones de BOSA [en línea]. Publicada por ITEC Technologies. Consultada en marzo de 2016. Disponible en: [https://ab-div-bdi-bl-blm.web.cern.ch/ab-div-bdi-bl-blm/Acquisition_system/optical links/BIDI/155Mbps_bosa.pdf](https://ab-div-bdi-bl-blm.web.cern.ch/ab-div-bdi-bl-blm/Acquisition_system/optical_links/BIDI/155Mbps_bosa.pdf)
- [58]*Tipos de pulido en los conectores de fibra óptica*. Artículo publicado por Asís Rodríguez el 20 de enero de 2014 en la web FibraOpticaHoy.com [en línea]. Disponible en: <http://www.fibraopticahoy.com/tipos-de-pulidos-en-los-conectores-de-fibra-optica/>
- [59]VALERO, Claudio. *La fibra óptica será clave para el desarrollo del 5G*. Artículo publicado para la web ADSLZONE el 15 de junio de 2016. Disponible en línea en: <http://www.adslzone.net/2016/06/15/la-fibra-optica-sera-clave-desarrollo-del-5g/>