



---

**Universidad de Valladolid**  
Facultad de Ciencias

**ANÁLISIS DE PRESTACIONES DE LÁSERES EN  
REDES DE ACCESO ÓPTICAS PASIVAS DE  
SIGUIENTE GENERACIÓN NG-PON2 (NEXT  
GENERATION PASSIVE OPTICAL NETWORKS)**

Máster en Física y Tecnología de los Láseres

Trabajo fin de máster

Autor:

Daniel Martín González

Tutor:

Noemí Merayo Álvarez

# Análisis de prestaciones de láseres en redes de acceso ópticas pasivas de siguiente generación NG-PON2 (Next Generation Passive Optical Networks).

## ÍNDICE

Resumen .....	4
Abstract .....	5
1 Introducción .....	6
1.1 Motivación .....	6
1.2 Objetivos .....	6
1.3 Estructura del Trabajo Fin de Máster.....	7
2 Redes ópticas de siguiente generación.....	8
2.1 Introducción .....	8
2.2 Funcionamiento y topologías de una Red PON .....	9
2.3 Redes de acceso de siguiente generación NG PON1 .....	13
2.4 Redes de acceso de siguiente generación NG PON2.....	13
2.5 Hybrid TDM-WDM PON.....	14
2.6 Stacked TDM PON .....	14
2.7 Requerimientos básicos de las redes TWDM PON .....	15
2.7.1 Plano de longitudes de onda empleadas .....	15
2.7.2 Tipo de láseres empleados.....	16
2.7.3 Requerimientos de los receptores .....	17
2.7.4 Tasa de transmisión de bits.....	17
2.7.5 Requerimientos de la ODN.....	17
2.7.6 Otros requerimientos.....	17

2.8	Análisis del Estado del Arte en Redes TWDM PON.....	18
2.9	Análisis de Redes TWDM PON a nivel físico .....	24
2.10	Introducción a la plataforma de simulación OptSim.....	26
2.11	Conclusiones .....	27
3	Simulación enfocada al incremento de la tasa de transmisión de datos	28
3.1	Introducción .....	28
3.2	Descripción del montaje de la arquitectura propuesta .....	28
3.3	Montaje y análisis de los resultados en OptSim.....	30
3.4	Conclusiones.....	33
4	Simulación de una arquitectura TWDM PON a 80Gb/s .....	34
4.1	Introducción .....	34
4.2	Descripción de la arquitectura TWDM PON.....	34
4.3	Montaje y análisis de resultados en OptSim .....	36
4.4	Conclusiones.....	39
5	Simulación de una arquitectura TWDM PON con remodulación en la señal de subida.....	40
5.1	Introducción .....	40
5.2	Descripción de la arquitectura propuesta.....	40
5.3	Montaje y análisis de nuestros resultados .....	42
5.4	Conclusiones.....	45
6	Conclusiones y líneas futuras de investigación.....	46
	Referencias.....	48

# Resumen

Este trabajo se centra en el estudio a nivel físico de las redes ópticas de acceso de siguiente generación (NG-PON2, *Next Generation Passive Optical Networks*), con las que se llegan a conseguir velocidades de transmisión de datos no inferiores a 40Gbits/s. Esto es gracias a la introducción de 4 longitudes de onda en cada sentido de transmisión. Además, estas redes tienen la ventaja añadida de conseguir transmisiones entre el OLT (Optical Line Termination) y las ONUs (Optical Network Units) de entre 40 y 60km (anteriormente se alcanzaban distancias de unos 20km). De las posibles opciones, las que han cobrado mayor fuerza en estos últimos años son las líneas de acceso múltiple por división del tiempo y longitud de onda (TWDM-PON).

El trabajo comienza con un análisis descriptivo de las características básicas más importantes de las redes ópticas de acceso actuales y describiendo con más detenimiento las características que han de tener las de nueva generación. Además, se hará un repaso de las arquitecturas más relevantes que han propuesto algunos autores. A continuación, se describirán arquitecturas TWDM-PON diseñadas y simuladas a nivel físico por otros autores y se compararán por las simuladas por nosotros mediante la plataforma de simulación OptSim. A partir de esas simulaciones, se estudiarán el número de usuarios máximo y máximas distancias que pueden soportar estas redes, sin que se reduzca su alta capacidad de tasas de transmisión, así como los amplificadores necesarios para transmitir la señal a las distancias requeridas. Por último, se comentarán los resultados más relevantes, y se sacarán las conclusiones pertinentes estipulando la línea de trabajo futuro a realizar en este campo.

## Abstract

This work focuses on the study of Next Generation Passive Optical Networks (NG PON2), which achieve data rates up to 40Gbits/s. This is thanks to the addition of 4 wavelengths at each channel. Besides, these networks provide the advantage of achieving end to end transmissions between the OLT (*Optical Line Termination*) and ONUs (*Optical Network Units*) up to 40 and 60km (typical PONs cover distances about 20km). Among very possible technology, the one that have gained the most force over the last years are Time and Wavelength Division Multiplexing Passive Optical Networks (TWDM PON).

This work begins with a descriptive analysis of the most important characteristics of the current optical access networks and deeply describing the characteristics that the new network generation should have. Besides, we will review most important architectures that have been proposed by some authors. Next, we will describe TWDM-PON architectures designed and simulated at the physical layer by other authors and we will compare them with those simulated by us using the OptSim simulation platform. In this way, it will be studied the maximum number of users and the maximum distance that these networks can support, without reducing their high capacity of transmission rates, as well as the number of amplifiers necessary to transmit the signal at the required distances. Finally, we will comment the most relevant results and obtain the relevant conclusions, stipulating the future line of work to be carried in this field.

# 1 Introducción

## 1.1 Motivación

Actualmente, las redes empleadas en comunicaciones ópticas tienen una capacidad de transmisión de datos que ronda el Gbit/s. Sin embargo, esta tasa de datos se comparte entre muchos usuarios, limitando esta tasa al orden de Mbits/s. A esto se une la demanda de velocidades cada vez mayores de datos a causa de la aparición de aplicaciones multimedia tales como los videojuegos en línea, o aplicaciones de visualización de videos o de videoconferencias. Por estos motivos, el desarrollo de nuevas tecnologías capaces de soportar una mayor cantidad de transmisión de datos es necesario [1].

A raíz de esto, los grupos de telecomunicaciones se juntan para desarrollar las llamadas redes de siguiente generación. Estas redes se pueden dividir en dos etapas, de las cuales, la primera ya está totalmente definida y aumenta la capacidad de transmisión de datos hasta 10Gbits/s. Sin embargo, al compartir la misma señal entre todos los usuarios, esto no es suficiente para las velocidades que se demandarán, y por ello surge la segunda etapa en el desarrollo de las redes de siguiente generación. Esta segunda etapa quiere incrementar la tasa de transmisión de datos hasta 40Gbits/s, empleando cuatro longitudes de onda tanto en el sentido de subida como en el de bajada, en lugar de emplear una en cada sentido como se hacía hasta ahora. Si con ello aún no es suficiente, esta etapa también prevé la introducción de cuatro longitudes de onda más en cada sentido, consiguiendo tasas de 80Gbits/s y así satisfacer las necesidades de los usuarios en un futuro no muy lejano.

## 1.2 Objetivos

Para implantar esta segunda etapa de redes de siguiente generación, se requiere un estudio previo de las posibles estructuras que cumplan los requisitos para poder elegir la mejor opción en su despliegue final. En este trabajo nos centraremos en estudiar esas posibles estructuras de la segunda etapa de las redes de siguiente generación. Para ello se realizará un análisis sobre las arquitecturas experimentales propuestas por otros autores, observando las ventajas e inconvenientes de cada una de ellas. Después se analizarán propuestas de simulaciones de estas arquitecturas, que servirán como punto de partida para implementar nuestras arquitecturas en la plataforma de simulación OptSim, la cual aprenderemos a manejar para analizar con más detenimiento estas arquitecturas.

## 1.3 Estructura del Trabajo Fin de Máster

En el capítulo 2 se introducirán las características de las redes de acceso ópticas pasivas, detallando las características de las redes actuales de comunicación. A continuación, se detallarán las características de las redes de siguiente generación, con especial interés en las de segunda etapa. De esta última, se revisarán las arquitecturas experimentales propuestas por otros autores analizando sus puntos fuertes. Después, describiremos algunas de las arquitecturas simuladas por otros autores. Como algunas de estas redes se van a implementar en nuestro programa de simulación (OptSim), se explicarán algunas de sus características que lo hacen adecuado para realizar este análisis.

En el capítulo 3 detallaremos una propuesta de arquitectura centrada en incrementar la tasa de transmisión de cada longitud de onda por encima de lo recomendado (10Gbits/s). Esta propuesta será implementada y analizada en OptSim realizando algunas variaciones.

En el capítulo 4 detallaremos una propuesta de arquitectura basada en el uso de ocho longitudes de onda en cada sentido, con lo que incrementar la tasa total de transmisión de datos. A continuación, se implementará en OptSim, para analizarla más detenidamente.

En el capítulo 5 detallaremos una propuesta de arquitectura en la que realiza una remodulación de la señal del sentido de bajada, para obtener otra en el sentido de subida. Nos basaremos en esta propuesta para realizar las modificaciones que consideremos oportunas para analizarla en OptSim.

En el capítulo 6 se muestran las conclusiones finales, comentando las posibles líneas de investigación futuras a raíz de este trabajo.

## 2 Redes ópticas de siguiente generación

### 2.1 Introducción

La red de acceso se puede definir como el conjunto de elementos que permiten conectar a cada abonado con la central local de la que es dependiente. En los últimos años, a esta red se la está asociando con el nombre de “primera milla (*first mile*)” o “última milla (*last mile*)”. La red de acceso, se compone principalmente de un Punto de Presencia (POP, *Point Of Presence*), también denominado oficina central (CO, *Central Office*), y en el otro extremo de la red el usuario final conectado. El tipo de enlace que une ambos extremos de la red dependerá de la tecnología desplegada, pudiendo ser cobre, cable coaxial, fibra óptica o tecnología inalámbrica.

Actualmente, el tráfico en las redes se está incrementando a unas tasas sin precedentes, propiciando que las redes de transporte hayan evolucionado y experimentado un sustancial crecimiento. Las tecnologías desplegadas hasta la actualidad, línea digital de abonado (DSL, *Digital Subscriber Line*) y cable coaxial no son capaces de cubrir todo el ancho de banda necesario para abastecer la creciente demanda de los usuarios finales de la red. La perceptible carencia de estas tecnologías y los nuevos requisitos de los servicios emergentes en la actualidad han propiciado el incremento del “cuello de botella” en el acceso. Por este motivo, la fibra óptica se ha consolidado como la mejor solución para hacer frente a los retos planteados en la red de acceso debido a su enorme capacidad para transportar información. Así pues, el despliegue de fibra óptica en el acceso se conoce como FTTH (*Fiber To The Home*). La integración de la fibra en el acceso pasa por el despliegue de las denominadas redes de acceso ópticas pasivas (PON, *Passive Optical Networks*), actualmente desplegadas de forma masiva a nivel mundial. Sin embargo, las redes ópticas de acceso han ido incrementando su capacidad de transmisión de datos recientemente debido al incremento del número de usuarios y de su consumo. Por lo tanto, se encuentra ya estandarizada la nueva generación de redes de acceso ópticas pasivas, que se dividen en dos tipos, NG PON1 (*Next Generation PON1*) y NG PON2 (*Next Generation PON2*). En este capítulo se describirán los principios de funcionamiento de todas estas tecnologías, haciendo especial hincapié en las redes de segunda generación NG PON2.



## 2.2 Funcionamiento y topologías de una Red PON

Para el despliegue de las redes de acceso ópticas pasivas PON se han barajado diferentes topologías, tanto punto-a-punto como punto-multipunto. La tendencia y estándares han establecido una topología de red óptica punto-multipunto, con la presencia de elementos únicamente pasivos en el camino entre la fuente y el destino. Los divisores ópticos serán elementos pasivos utilizados para dividir la fibra troncal en diferentes ramas de distribución que conectan a los usuarios finales con la oficina central. Esta topología minimiza el número de transceptores ópticos, terminaciones en la oficina central y despliegue de fibra óptica. Típicamente se usa una única fibra para ambas direcciones, con una longitud de onda para cada dirección, ascendente y descendente, utilizando para ello tecnología WDM (*Wavelength Division Multiplexing*). El funcionamiento de las redes PON se centra en una comunicación bidireccional entre una Unidad de Línea Óptica (OLT, *Optical Line Terminal*) localizada dentro de la oficina central, una línea óptica de distribución (ODN, *Optical Distribution Network*) compuesta por una fibra óptica seguida de un divisor óptico pasivo (*Splitter*), y varias Unidades de Red Óptica (ONUs, *Optical Network Units*) localizadas dentro o cerca de las dependencias del abonado final. El OLT se conecta punto-a punto con el Splitter, y éste último con las ONUs mediante una conectividad punto-multipunto. Esta arquitectura de red de acceso es la que más se está implantando en la actualidad ya que ofrece diversas ventajas [1], [2], [3]:

- Permiten servir a usuarios localizados a distancias de hasta 20-25 kilómetros desde la oficina central.
- Minimizan el despliegue de fibra en el bucle local al utilizar topologías en árbol, más eficientes que las topologías punto a punto. Además, estas arquitecturas simplifican la densidad del equipamiento de la central, reduciendo el consumo y los costes.
- Ofrecen una mayor densidad de ancho de banda por usuario debido a la mayor capacidad de la fibra para transportar información que otras alternativas actuales.
- Elevan la calidad del servicio y simplifican el mantenimiento de la red, al ser inmunes a ruidos electromagnéticos, no propagar las descargas eléctricas procedentes de rayos, etc.

- Permite mayores tasas de transmisión superponiendo longitudes de onda adicionales.

La topología en árbol es la arquitectura más típica de una red PON, cubriendo distancias de entre diez y veinte kilómetros. Todos los usuarios comparten gran parte de la infraestructura, lo cual reduce los costes de implantación y mantenimiento. Esta topología presenta las ventajas de tener un cableado punto-a-punto para unir los segmentos individuales y es una arquitectura que está soportada por multitud de vendedores de software y de hardware para su implementación, como se observa en la Figura 1. Por el contrario, presenta las desventajas de que, si se produce un fallo en el segmento principal, toda la red se viene abajo con él y su configuración es más difícil en comparación con otras topologías.

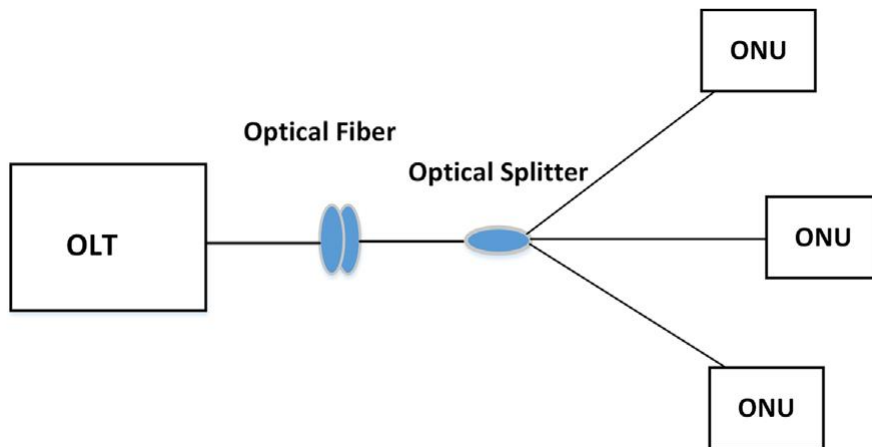


Figura 1. Esquema básico de las redes PON [1].

Una red PON típica con topología en árbol se compone de un canal descendente o *downstream* y de uno ascendente o *upstream*. En el canal descendente, una PON es una red punto multipunto, donde el OLT envía a todas las ONUs la misma información por difusión a través del *splitter*. Junto con la información, se envía un identificador. De esta manera, cada ONU sólo procesa el tráfico que le corresponde o para el que tiene acceso por parte del operador. Cuando llega el paquete de información a la ONU, si el identificador que trae dicho paquete corresponde con el de la estación, se acepta la información. Por el contrario, si esos identificadores no corresponden a la ONU, ésta elimina la información sin procesarla.

En el canal ascendente o *upstream*, la PON es una red punto-a-punto donde múltiples ONUs transmiten hacia el OLT. En este caso, el divisor pasivo o *splitter* hace de combinador y manda todo lo que le llega de las ONUs hacia el OLT por un único canal. El OLT acepta todo lo que le llega desde las ONUs ya que es el receptor de toda esa información y el encargado de procesarla y enviarla fuera de la red de acceso hacia la red troncal. En la Figura 2 se observa el funcionamiento general de una red PON con sus canales ascendente y descendente.

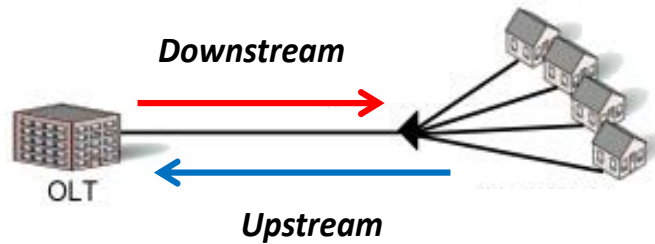


Figura 2. Funcionamiento de una red PON.

Como ya se ha comentado, el medio óptico en una red PON es común para todos los abonados en el canal ascendente (*upstream*). Este hecho tiene importantes implicaciones a la hora de definir cómo se arbitra el tráfico en dicho canal. Por ello es importante establecer un esquema en el que el OLT sea el encargado de arbitrar el momento en el que cada ONU puede emitir información, para evitar posibles colisiones de datos. En cada trama de bajada se incluye un campo en el que el OLT indica una referencia temporal para que cada ONU conozca cuando empezar a emitir datos. Esta referencia temporal es dinámica y variable, siendo el OLT el encargado de decidir las asignaciones de ancho de banda correspondientes dependiendo de la demanda de cada ONU.

La generación actual de redes PON está basada en TDM (*time division multiplexing*). TDM es la técnica donde varias señales ópticas de la misma longitud de onda son combinadas, transmitidas juntas y separadas nuevamente basado en diferentes tiempos de llegada. Esto está esquematizado en la Figura 3 [4].

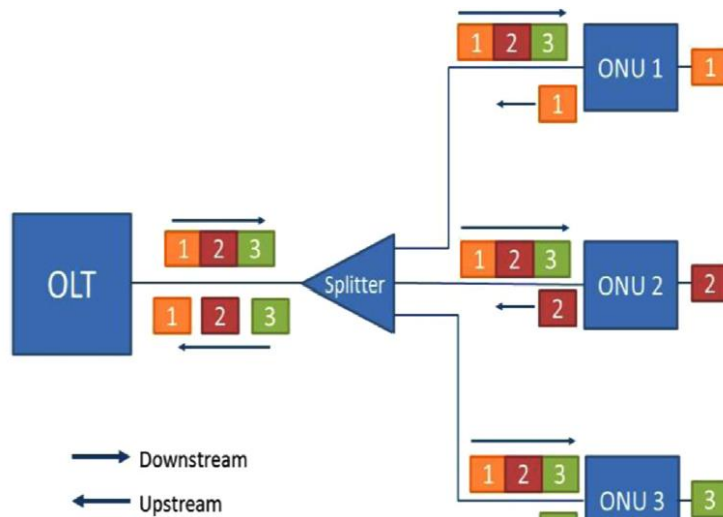


Figura 3. Funcionamiento de TDM [4].

En la Tabla 1 se puede ver una comparativa sobre los estándares de este tipo de redes. G-PON está ampliamente extendida por Japón y Corea del Sur alcanzando un ancho de banda máximo de 2,5Gb/s en el sentido de bajada o 1,5Gb/s en el de subida, para un máximo de 64 usuarios. En el caso de Estados Unidos y Europa, la red utilizada es la E-PON con un ancho de banda simétrico de 1,25Gb/s para un máximo de 32 usuarios. En cualquier caso, las distancias alcanzadas por esta generación están en torno a los 20km [1].

	A-PON	B-PON	E-PON	G-PON
<b>Standards</b>	ITU-T G.983.1	ITU-T G.983.x	IEEE 802.3ah	ITU-T G.984.x
<b>Framing</b>	ATM	ATM	Ethernet	GEM
<b>Maximum Bandwidth</b>	155 Mb/s (↓↑)	622 Mb/s (↓↑)	1.25 Gb/s (↓↑)	2.5 Gb/s (↓) 1.5 Gb/s (↑)
<b>User per PON</b>	16–32	16–32	16–32	32–64
<b>Bandwidth per user</b>	10–20 Mb/s	20–40 Mb/s	30–60 Mb/s	40–80 Mb/s
<b>Video</b>	RF/IP	RF/IP	RF/IP	RF/IP
<b>Cost</b>	Low	Low	Low	Medium

ATM: Asynchronous transfer mode.

GEM: G-PON encapsulation mode.

RF/IP: Radio frequency/internet protocol.

Tabla 1. Características de las redes PON actuales [1].

La creciente demanda de ancho de banda por los usuarios, ha propiciado una evolución de las redes PON actuales hacia los estándares de siguiente generación NG-PON1 y NG-PON2.

## 2.3 Redes de acceso de siguiente generación NG PON1

La migración de las redes PON a las NG PON debe darse poco a poco, ofreciendo cada vez más ancho de banda, es decir, deben de mantener la misma ODN (fibra y *splitter*) para permitir la coexistencia con las tecnologías anteriores, modificando únicamente la OLT y las ONUs.

En la primera generación de redes PON se consiguen tasas de transmisión de 10Gb/s, lo cual ya supone un gran avance respecto a las redes actuales. Estas redes surgen como una evolución de las anteriores y se pueden dividir en XG PON (10 *Gigabit* PON) y 10G EPON (10 *Gigabit Ethernet* PON), cuyas características fundamentales son similares (Tabla 2). La técnica dominante de este tipo de redes sigue siendo la TDM, utilizando una longitud de onda en el sentido de subida y otra en el de bajada. El número de usuarios finales también se incrementa hasta un mínimo de 64, mientras que la distancia alcanzada permanece en unos 20km.

	Mid-term next-generation PONs (TDM-PONs)		
	10 GE-PON	XG-PON1	XG-PON2
<b>Standards</b>	IEEE 802.3av (draft)	FSAN	FSAN
<b>Framing</b>	Ethernet	GEM	GEM
<b>Maximum bandwidth</b>	10 Gb/s (↓↑)	10 Gb/s (↓) 2.5 Gb/s (↑)	10 Gb/s (↓↑)
<b>User per PON</b>	≥ 64	≥ 64	≥ 64
<b>Bandwidth per user</b>	≥ 100 Mb/s	≥ 100 Mb/s	≥ 100 Mb/s
<b>Video</b>	RF/IP	RF/IP	RF/IP
<b>Cost</b>	High	High	High

RF/IP: Radio frequency/internet protocol.

Tabla 2. Comparativa de las redes de primera generación [1].

## 2.4 Redes de acceso de siguiente generación NG PON2

La segunda generación de redes PON es una evolución de la primera. En ella se emplean cuatro longitudes de onda en la transmisión de datos, con lo que se alcanzarían tasas de 40Gb/s. En este caso la red recomendada es la unión entre TDM y WDM, llamada TWDM (*Time and Wavelength Divison Multiplexing*), que consiste en asignar una longitud de onda en un periodo de tiempo determinado a cada ONU. Se explicará con más detenimiento en los próximos apartados.

Las redes TWDM pueden responder a dos estructuras distintas: *Hybrid* TDM-WDM PON y *Stacked* TDM PON. Estas redes se describen brevemente a continuación [5]:

## 2.5 Hybrid TDM-WDM PON

La estructura básica puede verse en la Figura 4. En ella se muestran cuatro longitudes de onda, cada una transmitiendo a 10Gb/s, que parten de la OLT y se mezclan mediante un multiplexor. Luego son conducidas por una fibra óptica monomodo hasta un demultiplexor que separa las longitudes de onda en cuatro canales. Cada uno de estos cuatro canales es dividido a un cierto grupo de usuarios que comparten esa longitud de onda en el dominio del tiempo.

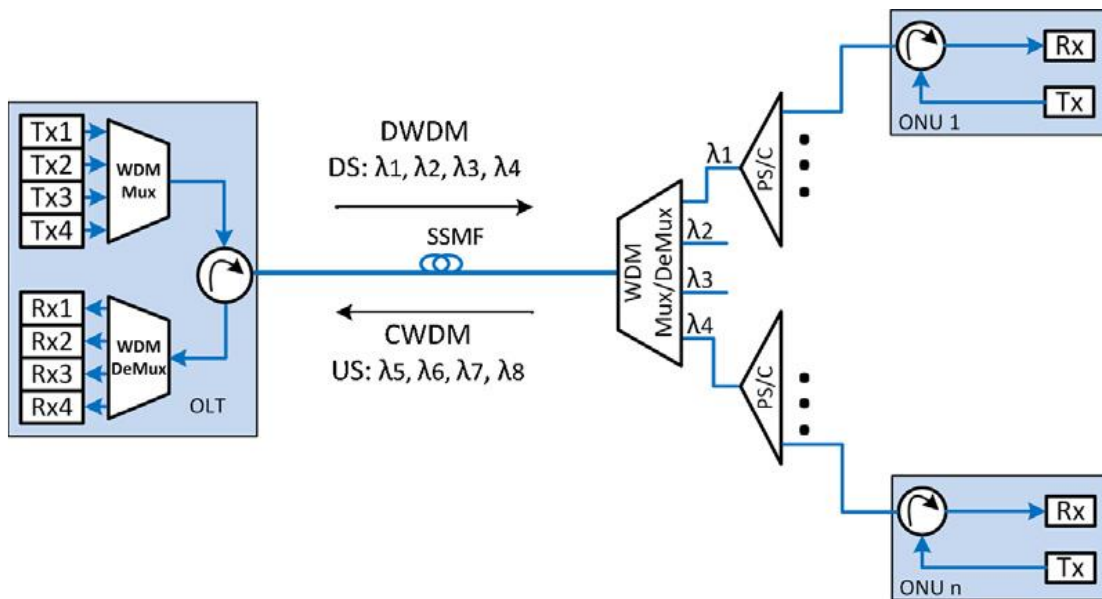


Figura 4. Estructura del Hybrid TDM-WDM PON [5].

## 2.6 Stacked TDM PON

La estructura básica de este tipo de red se muestra en la Figura 5. La diferencia básica respecto de la red anterior se basa en la sustitución del demultiplexor por un *splitter*. Esto hace que lleguen a cada ONU las cuatro longitudes de onda, por lo que será necesario el uso de filtros sintonizables, para seleccionar cada una de ellas en el momento requerido.

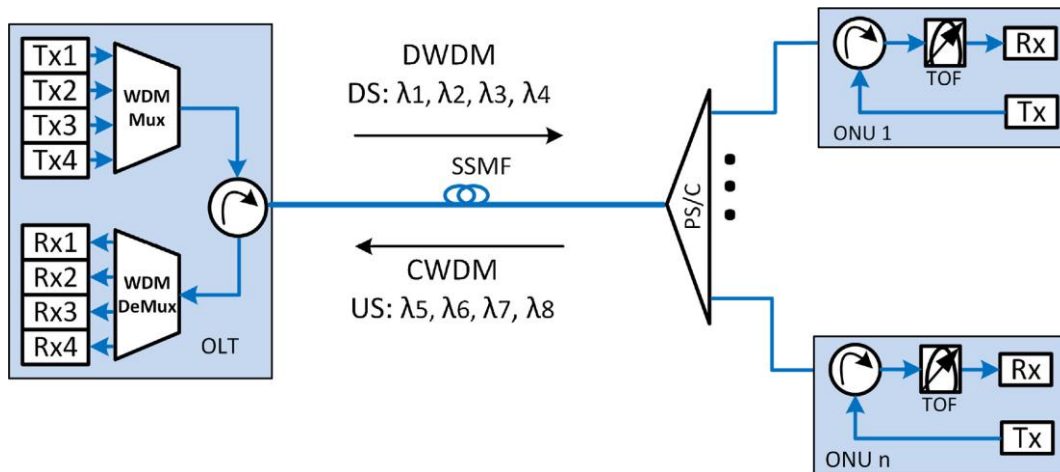


Figura 5. Estructura del Stacked TDM PON [5].

Ambas estructuras tienen ventajas e inconvenientes. Se ha demostrado que la estructura híbrida funciona mejor. Esto es debido a que el demultiplexor no genera tantas pérdidas como el *splitter*. Sin embargo, la ODN no es compatible con el standard existente debido al demultiplexor, y habría que modificar todas las redes ya existentes. La estructura “stacked” sí que aprovecharía las ODNs existentes. Además, tiene otras ventajas. Por ejemplo, si se quiere transmitir solo a 20Gb/s, la OLT puede optar por operar con dos longitudes de onda, mientras que con la estructura híbrida esto no sería posible, pues siempre tendrían que estar en funcionamiento los cuatro láseres de la OLT para suministrar a las ONUs, pues la longitud de onda del receptor es fija.

## 2.7 Requerimientos básicos de las redes TWDM PON

En el 2012, la FSAN (*Full Service Access Network*) selecciona la TWDM PON para la nueva generación de redes ópticas, NG PON2. A partir de 2013, la ITU (*International Telecommunication Union*), ha publicado recomendaciones que regulan las características de estas redes. Dentro de las recomendaciones de la ITU, hay numerosas variantes porque aún no hay una normativa definida al respecto. Por este motivo se comentarán las características más típicamente utilizadas [1], [4], [6], [7], [8]:

### 2.7.1 Plano de longitudes de onda empleadas

Las longitudes de onda destinadas al *downstream* se encontrarían en la banda L, entre 1596 y 1603nm, mientras que para el *upstream* estarían en torno a 1532 y 1549nm. La separación entre dos canales consecutivos sería de 100GHz. El uso de las longitudes de

onda seleccionadas, tiene como finalidad que puedan coexistir en la misma fibra tecnologías anteriores con la de la nueva generación, sin que interfieran entre sí.

### 2.7.2 Tipo de láseres empleados

Cada ONU debe estar equipada con un transmisor y receptor sintonizable para cualquiera de las longitudes de onda. Los láseres empleados más comúnmente en las ONUs son los DFB (*Distributed FeedBack*), cuya longitud de onda se selecciona por control de la temperatura y los DBR (*Distributed Bragg Reflector*). En cualquier caso, lo deseable es que estos láseres se sintonicen suficientemente rápido, lo cual implicaría cambios muy bruscos de temperatura que puede derivar en un error en la longitud de onda transmitida. Esto es un reto que se debe superar por los fabricantes. Para los DFB sintonizables con temperatura los tiempos de sintonización serían del orden de 25-1000ms. En el caso de un *stack* de láseres, cada uno con su longitud de onda y sintonizados por medio de filtros, los tiempos serían inferiores a  $10\mu m$ .

En cuanto a la OLT, lo más común sería emplear cuatro láseres DFB cada uno en una longitud de onda, pues deberán estar emitiendo continuamente en las cuatro longitudes de onda.

Por otro lado, para obtener una señal pulsada, la salida de los láseres ha de ser modulada. La modulación puede ser directa o externa. El problema de la primera es que se modula al láser con una corriente, lo cual introduce *chirp* a los pulsos y por tanto empeora la señal. Este *chirp* tiene que ser compensado para que sea viable trabajar con este tipo de modulación. Para la modulación externa se genera una señal eléctrica pulsada en función de los “1” y “0” que se quiera transmitir. A continuación, se sitúa el modulador (típicamente un interferómetro Mach Zehnder) al que le llega tanto la señal eléctrica como la óptica del láser. El modulador transforma la señal óptica continua en la señal óptica pulsada deseada. Hay dos formatos de modulación muy usados: NRZ (*Non Return to Zero*) y RZ (*Return to Zero*). La modulación NRZ, recibe este nombre porque cuando transmite dos bits “1” seguidos, la señal no vuelve a 0, sino que se mantiene en el nivel alto entre transiciones. Por el contrario, el formato RZ pasa por un mínimo en la transición entre de dos bits “1” consecutivos. Este último, introduce más error, por lo que la recomendación de la ITU es usar el NRZ.



### 2.7.3 Requerimientos de los receptores

Los receptores situados en las ONUs deben ser capaces de seleccionar cada longitud de onda en un tiempo determinado. Por ello se requiere el uso de filtros sintonizables suficientemente rápidos. El receptor suele ser un fotodiodo PIN (llamado así por su composición de una capa intrínseca, otra dopada P y otra dopada N), o un fotodiodo de avalancha (APD, *Avalanche Photodiode*). Este último, mejora notablemente la señal, aunque también resulta más caro por lo que la mejor opción sería el fotodiodo PIN.

La señal recibida en el receptor se dice que es buena cuando tiene un BER (*Bit Error Rate*) inferior a  $10^{-9}$ . Sin embargo, recomendaciones más restrictivas lo sitúan en  $10^{-12}$ .

### 2.7.4 Tasa de transmisión de bits

La tasa de bits transmitida por cada láser puede ser de 10Gb/s o de 2,5Gb/s. Las combinaciones posibles podrían ser transmisión simétrica a esas tasas o asimétrica, con 10Gb/s para el *downstream* y 2,5Gb/s para el *upstream*. La más atractiva es la que pueda transmitir de manera simétrica 10Gb/s, que con el uso de cuatro láseres se obtendrían tasas de 40Gb/s. Además, se contempla la posibilidad de ir añadiendo longitudes de onda según sea necesario, hasta ocho.

### 2.7.5 Requerimientos de la ODN

Según las recomendaciones de la ITU, la fibra óptica utilizada es la monomodo con longitudes de al menos 40km. Al final de la fibra se encontraría un *splitter* que dividiría la señal entre un mínimo de 64 usuarios, aunque recomendaciones más estrictas lo sitúan en al menos 256 usuarios.

### 2.7.6 Otros requerimientos

Es deseable que el coste de los componentes sea el menor posible, que no consuma mucha energía y que sea compatible con otras arquitecturas anteriores. Todo ello para que los clientes no tengan que pagar grandes cantidades de dinero por el uso de este servicio.

Para compartir costes entre todos los usuarios, si se requiere es preferible situar un amplificador en la OLT, el cual aumenta la potencia del *downstream* y pre amplifica la señal del *upstream*.

Para amplificar la señal la mejor opción es usar un EDFA (*Erbium Doped Fiber Amplification*), pues amplifica prácticamente por igual las cuatro longitudes de onda empleadas, introduciendo poco ruido en la señal. También se emplean SOA (*Semiconductor Optical Amplifier*) o RSOA (*Reflective Semiconductor Optical Amplifier*)

para amplificar cada longitud de onda por separado, porque son más baratos, pero introducen más ruido. Además, los RSOA están empleándose cada vez más como moduladores. La señal óptica le llegaría mediante un láser de diodo en emisión continua, mientras que una señal lógica junto con un NRZ, controlan la intensidad del RSOA, modulando así la señal de salida.

A pesar de contener elementos no pasivos como son los amplificadores, la ODN sigue siendo pasiva al encontrarse éstos en puntos específicos de la red como son la OLT y las ONUs.

## 2.8 Análisis del Estado del Arte en Redes TWDM PON

Desde que la NG PON2 comenzara a definirse en 2012 hasta la fecha, se han propuesto diversos tipos de montajes. En este apartado se explicarán algunos de los más representativos.

El primer prototipo de una red TWDM PON a 40Gb/s fue demostrado por Luo [9]. Sin embargo, aún no se habían definido muchas características y tenían por tanto más libertad. Por ello, para el *downstream* tomaron cuatro láseres con longitudes de onda entre 1555 y 1560nm, separadas 200GHz. Para el *upstream* sí usaron el espaciado habitual de 100GHz, con unas longitudes de onda comprendidas entre 1535 y 1540nm. Para mejorar la señal tanto de subida como de bajada, emplearon un EDFA en la OLT. En las ONUs usaron láseres DFB sintonizados térmicamente. Para el receptor emplearon un filtro sintonizable seguido de un APD RSOA. Cada ONU es capaz de transmitir en cualquier longitud de onda con ayuda de un software de control. En este prototipo, también se demuestra la compatibilidad del TWDM PON con otras tecnologías anteriores como la XG PON o la G PON (ver Figura 6). La ODN contiene dos tramos divisores. Un *splitter* 1:8 seguido de otro *splitter* 1:64 para distribuir la señal a un total de 512 usuarios. En esta situación se consiguió transferir la señal un total de 20km. Sin embargo, la distancia se podría incrementar a 40km para 128 usuarios o hasta 60km para 64 usuarios.

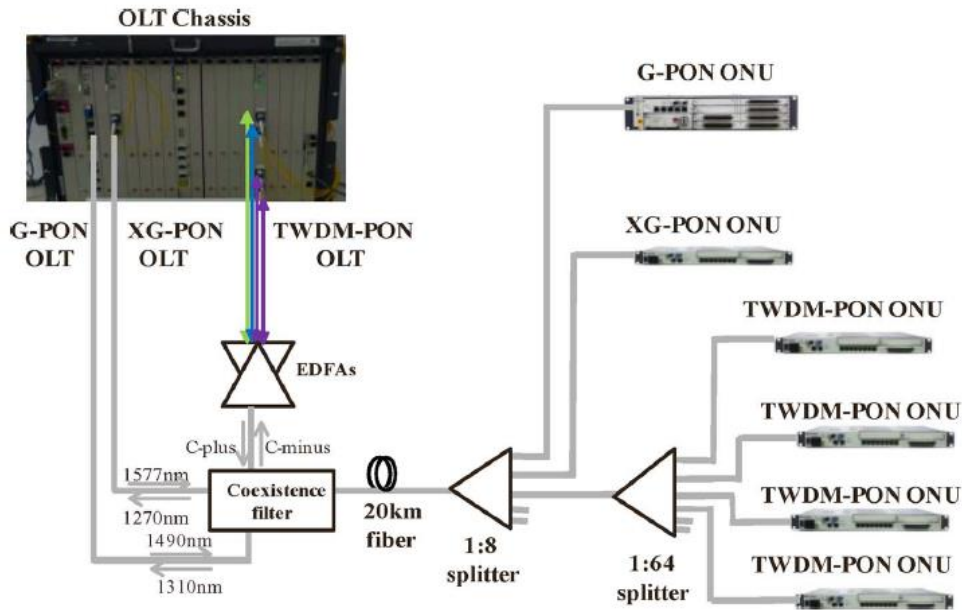


Figura 6. Propuesta de la arquitectura de Luo [9]

Otro de los primeros montajes de este tipo es el descrito por Guo [10]. Con él demuestra un sistema TWDM PON a 40Gb/s con coexistencia con planes anteriores (Figura 7). En la dirección de bajada emplea cuatro láseres con modulación externa a 10Gb/s, con longitudes de onda situadas en la banda L+, espaciados 100GHz. Emplean un filtro sintonizable en cada ONU seguido de un receptor APD para seleccionar cada una de las longitudes de onda. En la dirección de subida emplean un láser con modulación directa a 10Gb/s. Esto permite reducir los costes, pero introduce *chirp* a la señal, que debe ser corregido. La longitud de onda la regulan por control de temperatura de 196,65 a 196,25THz espaciados 100GHz. En el receptor de la OLT usan un APD, cuya señal es amplificada por un TIA. Para corregir el *chirp*, emplean una compensación electrónica de la dispersión. La modulación tanto en el sentido de subida como en el de bajada es llevada a cabo mediante el código NRZ. En este caso no usan amplificadores, sino que lo que hacen es aumentar la potencia de salida de los láseres para transmitir a 20 y 40km. El número de ONUs contemplados es de 64.

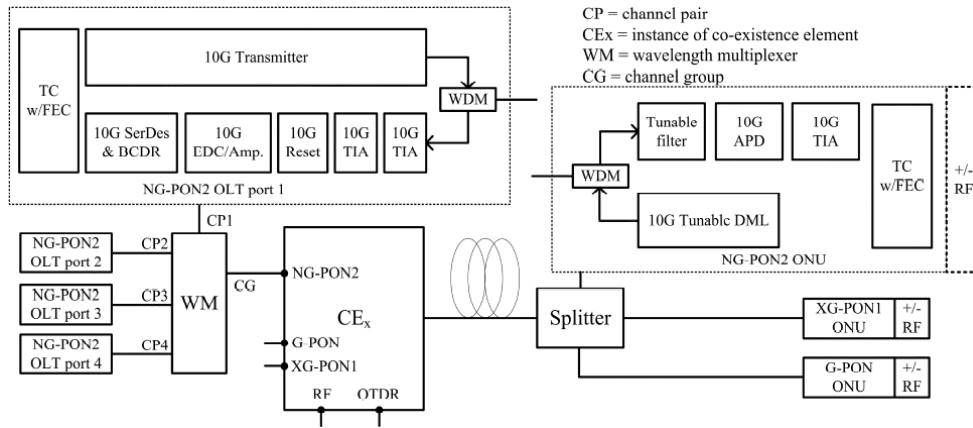


Figura 7. Propuesta de la arquitectura de Guo [10]

Yi [11], hace un montaje similar al de Guo, pero para compensar el *chirp* introducido por los láseres directamente modulados simplemente filtra la señal. En la OLT introduce un EDFA bidireccional, para amplificar tanto la señal de subida como de bajada, y así no tienen que aumentar la potencia de salida de los láseres (Figura 8). Otra diferencia es el uso de fotodiodos PIN como receptores en lugar de los APD del anterior artículo. Además, amplifica la señal que le llega a cada ONU con un RSOA. Con este montaje consiguen transmitir la señal a 1000 usuarios en 25km.

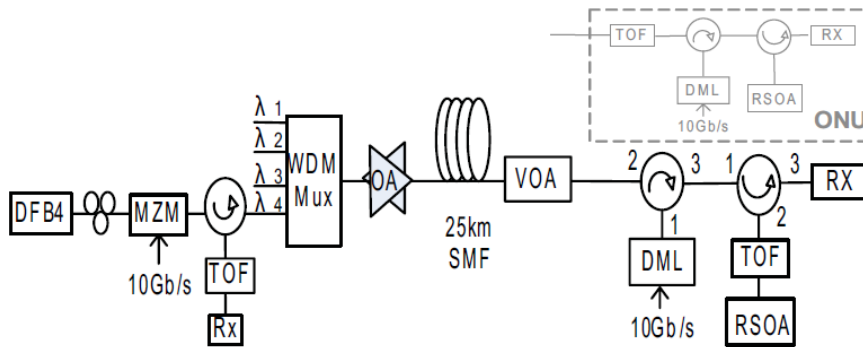


Figura 8. Propuesta de la arquitectura de Yi [11]

Otro artículo donde usan modulación directa es descrito por Bi [12]. En la OLT se usan 4 láseres DFB directamente modulados, cada uno de ellos a 10Gb/s. Se hacen pasar primero por un multiplexor y luego por un interferómetro de retardo para corregir el *chirp* (Figura 9). Después, las señales se amplifican con un EDFA y son guiadas por una fibra óptica monomodo. En cada ONU las señales se seleccionan mediante un filtro sintonizable antes de ser detectadas por un APD. Como transmisor se emplea un láser DFB a 9dBm modulado directamente y con la posibilidad de seleccionar cualquiera de las

longitudes de onda de subida por control de la temperatura. Después de pasar por la fibra, es pre amplificada por el EDFA y llega a un interferómetro de retardo para corregir el *chirp*. Las señales en la OLT se detectarán nuevamente con un APD. Consiguieron transmitir la señal en 50, 75 y 100km para 1024, 256 y 64 usuarios respectivamente. Se puede apreciar que la mejora es notable respecto a los otros artículos que usan modulación directa, por lo que parece que la compensación del *chirp* mediante un interferómetro de retardo es la mejor opción.

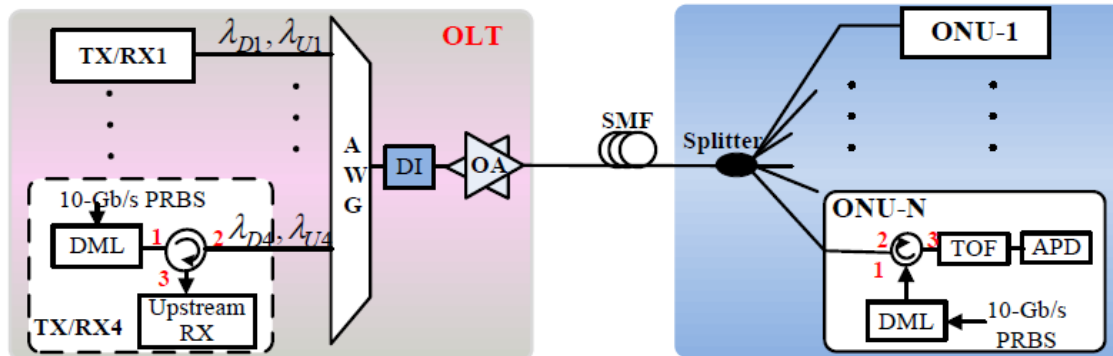


Figura 9. Propuesta de la arquitectura de Bi [12]

Otro método novedoso de compensación del *chirp*, consiste en usar láseres DBR de tres secciones modulados directamente [13]. En una sección se controlaría la red de difracción, encargada de seleccionar la longitud de onda, con otra sección la fase, y con la otra la potencia de salida. Modificando estos parámetros se podría compensar el *chirp* de la modulación directa, pero de momento tiene limitaciones, y se siguen usando comúnmente los láseres DFB.

Para acabar de revisar los posibles montajes que usan modulación directa, Bindhaiq [14], utiliza la modulación directa en un RSOA. En La OLT, 4 diodos láser alimentan, cada uno, un RSOA mientras es modulado directamente a 10Gb/s (Figura 10). Con el RSOA la señal es modulada tanto en amplitud como en fase. El problema de la modulación con un RSOA es que su frecuencia de respuesta no es suficientemente alta y esto limita la anchura espectral de la señal. Por eso, aquí usan un interferómetro de retardo para compensarlo. El receptor consiste en un SOA para mejorar la señal, seguido de un filtro sintonizable y un fotodiodo PIN. Para el *upstream* el montaje es similar. Con ello transmiten la señal a 32 usuarios en 40km. En este montaje se han dedicado más en reducir costes que en cumplir las expectativas del NG PON2, aunque merece la pena mencionarlo, pues en un futuro tal vez se logre mejorar esta propuesta.

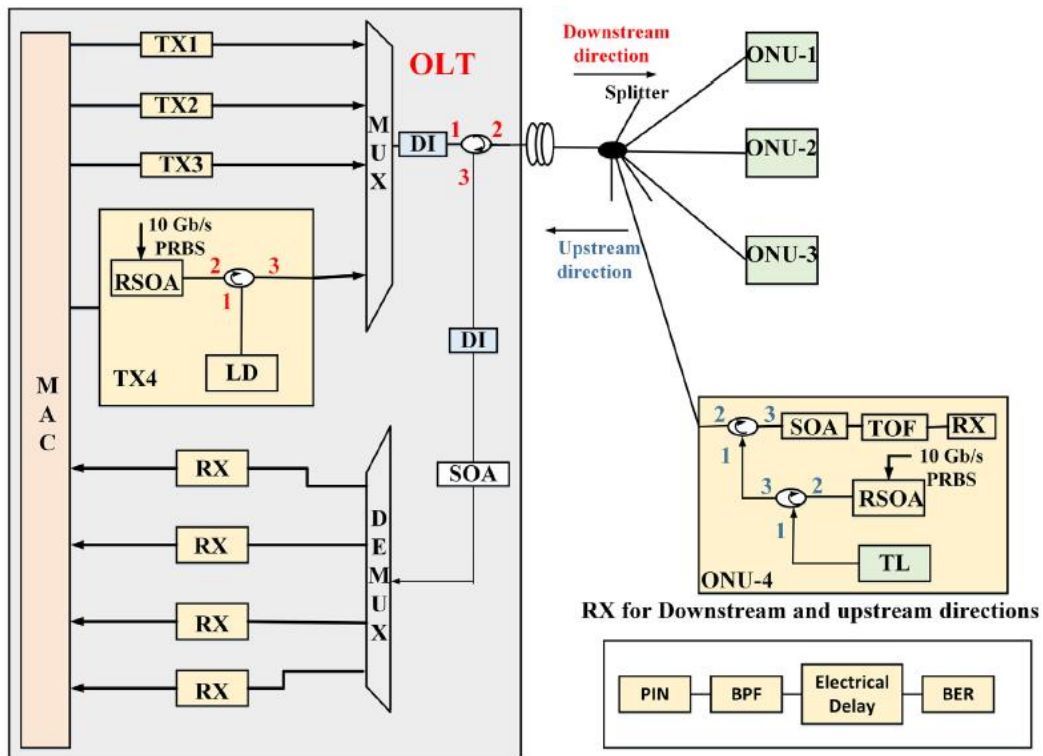


Figura 10. Propuesta de la arquitectura de Bindhaiq [14]

Ianone [15], demuestra un sistema TWDM PON, en el que se utiliza amplificación Raman para 8 canales en el sentido de subida. En la OLT, sitúa 8 láseres DFB modulados a 10Gb/s con un modulador Mach Zehnder. Las 8 longitudes de onda se encuentran en la banda L separadas 100GHz. La señal es amplificada por un EDFA hasta 10dBm antes de introducirse en una fibra óptica de 42km. Luego es dividida primero por un *splitter* 1:32 y después por un *splitter* 1:8, para llegar a 256 ONUs. La señal es seleccionada con un filtro sintonizable seguido de un APD. En el sentido de subida se procede de manera similar, salvo que los láseres emiten a 1dBm y son amplificadas por efecto Raman. Para ello usan un bombeo a 1425nm de unos 0,45W. La ventaja de la amplificación Raman frente a los otros tipos de amplificaciones es que se produce una ganancia distribuida en toda la fibra, y no en un único punto.

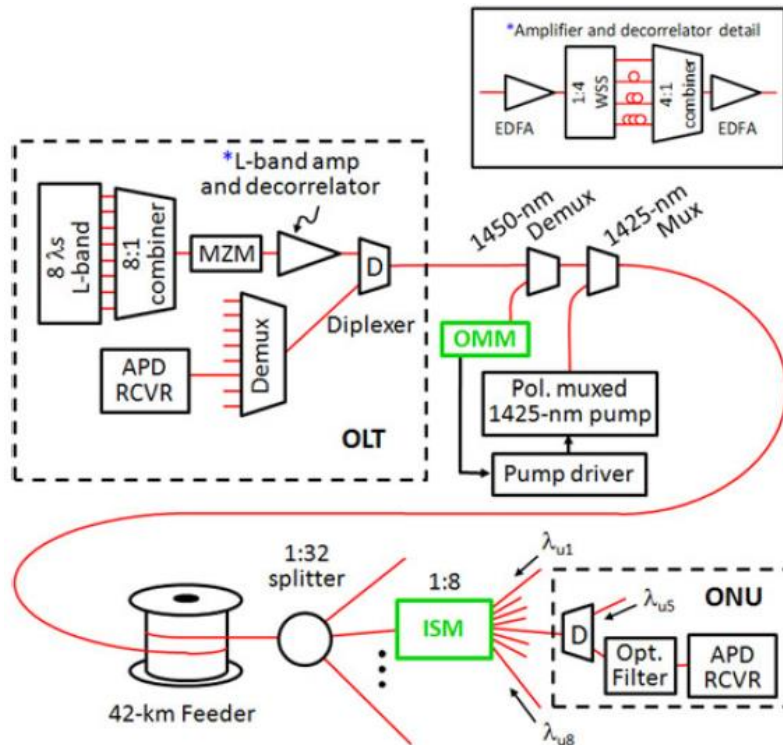


Figura 11. Arquitectura propuesta por Iannone [15]

En cuanto a la amplificación Raman, se da más habitualmente de lo que parece. Por ejemplo, la señal del *upstream*, que tiene una longitud de onda más pequeña, puede servir de bombeo Raman para el *downstream* con ganancias que pueden llegar a 1,5dB dependiendo de la potencia aplicada. Además, la coexistencia con otros planes como el G PON (a 1490nm) también puede actuar como bombeo Raman para el *downstream*. Esto no se suele tener en cuenta, pero puede resultar importante en muchos casos [8].

Finalmente, en la Tabla 3 se puede encontrar una comparación de las características y parámetros más importantes de las arquitecturas TWDM PON descritas en este apartado.

Autor	Tasa de transmisión	Láseres en la ONU	Compensación del chirp	Amplificadores	Distancia	Usuarios
Luo [9]	40 Gb/s simétrica	DFB	No se menciona	EDFA en la OLT	-20km -40km -60km	-512 -128 -64
Guo [10]	40Gb/s simétrica	DFB directamente modulados	Compensación electrónica de la dispersión	No usa	40km	64
Yi [11]	40Gb/s simétrica	DFB directamente modulados	Mediante filtros	EDFA en la OLT y RSOA en las ONUs	25km	1000
Bi [12]	40Gb/s simétrica	DFB directamente modulados	Interferómetro de retardo	EDFA en la OLT	-50km -75km -100km	-1024 -256 -64

Bindhaiq [14]	40Gb/s simétrica	DFB directamente modulados en RSOA	Interferómetro de retardo	SOA en las ONUs y en la OLT	40km	32
Ianone [15]	80Gb/s simétrica	DFB con modulación externa	No es necesaria	EDFA en la OLT y amplificación Raman para el <i>upstream</i>	42km	256

Tabla 3. Características implementadas por algunos autores a las redes TWDM PON

## 2.9 Análisis de Redes TWDM PON a nivel físico

Como no siempre se puede hacer un análisis experimental por falta de recursos, se suele recurrir a programas de simulación a la hora de proponer nuevas arquitecturas de red. En este apartado se describirán algunas propuestas de estas arquitecturas simuladas.

Ajibodu [16] propone una arquitectura TWDM PON realizado con el programa OptiSystem [17]. En él se analizan las prestaciones de la red al aumentar la tasa de transmisión, aunque solo hacen el análisis en el sentido de bajada. En la dirección de bajada emplea cuatro láseres con modulación externa a 10Gb/s, con longitudes de onda situadas entre 1596,34nm y 1598,89nm, espaciados 100GHz. La modulación es realizada mediante un NRZ y un Mach Zehnder. Se usan filtros sintonizables para seleccionar la longitud de onda de cada ONU, antes de ser detectada por el receptor. Con este montaje consiguen llegar a 16 usuarios en 50km, para una tasa de transmisión de cada láser de 10Gb/s (un total de 40Gb/s). Al aumentar la tasa de cada láser observan una degradación de la señal, pudiendo transmitir para los mismos usuarios a 11Gb/s en 38km, a 12Gb/s en 26km y a 13Gb/s en 14km.

Bindhaiq [18], propone otra arquitectura utilizando el mismo programa que el artículo anterior. En él se emplean ocho láseres de emisión continua, modulados externamente, para conseguir una tasa de 80Gb/s. Las longitudes de onda empleadas se encuentran entre 15704 y 1576nm con una separación de 0,8nm (unos 100GHz). La modulación también es realizada mediante un NRZ y un Mach Zehnder. En las ONUs, la longitud de onda es seleccionada mediante un filtro sintonizable y amplificada mediante un SOA, antes de ser detectada por un fotodiodo PIN. Con este montaje se consigue transmitir la señal a 512 usuarios en 50km.

Choudhary [19], usa el programa de simulación OptSim [20], para demostrar un sistema TWDM PON híbrida con remodulación de la señal en el *upstream*. En el sentido



de bajada se emplean 4 láseres de emisión continua, moduladas externamente a 10Gb/s. Las longitudes de onda están comprendidas entre 1550,12 y 1547,72nm espaciadas 100GHz y la modulación es realizada mediante un NRZ y un Mach Zehnder. Las señales se juntan mediante un multiplexor y son conducidas por una fibra óptica monomodo seguida de un EDFA y un demultiplexor, el cual vuelve a separar las cuatro longitudes de onda. Un *splitter* divide cada una de ellas entre un grupo de usuarios. Parte de la señal de cada longitud de onda la remodulan en amplitud, ahorrándose el uso de un láser como transmisor. A continuación, juntan las cuatro señales con un multiplexor y se transmiten con otra fibra. Finalmente, la señal es amplificada con otro EDFA, dividida y recogida por los receptores de la OLT. Con este montaje consiguen llegar a 64 usuarios en 32km, pudiéndose ampliar al añadir otro EDFA en el sentido de bajada hasta 1024 usuarios a la misma distancia.

Sung [21], demuestra un sistema TWDM PON en el programa de simulación VPI [22]. Emplean cuatro láseres DFB con separación de 100GHz entre ellos y modulados directamente a 25Gb/s cada uno. El tiempo de respuesta de la modulación es insuficiente y por eso, una vez unidos los cuatro canales mediante un multiplexor, lo corrigen filtrando la señal. Esta señal es amplificada por un EDFA bidireccional y transmitida a través de una fibra óptica monomodo. Finalmente es recibida por un fotodiodo PIN, previo paso por un filtro sintonizable a cualquier longitud de onda. Dados los problemas de trabajar a 25 Gb/s, consiguen transmitir la señal a 20km, aunque no hablan del número de usuarios a los que les llegaría.

Kachhatiya [23], propone otra arquitectura en la plataforma de simulación OptiSystem. En la OLT emplean ocho láseres de emisión continua, modulados en un Mach Zehnder con un PRBS a 10Gb/s y un NRZ. Los ocho canales se juntan con un multiplexor y son amplificados por un EDFA. En las ONUs se filtra la longitud de onda mediante un filtro sintonizable y se recoge la señal por medio de un APD, y un filtro eléctrico. Las ONUs transmiten a 10Gb/s por cada longitud de onda y usan un RZ para una modulación retardada en amplitud, basada en distintos tiempos de retardo para cada ONU que transmite en la misma longitud de onda. En la OLT corrigen la dispersión producida al transmitir la señal por la fibra usando una fibra de dispersión negativa. A continuación, es pre amplificada por un EDFA, demultiplexada para dividirla nuevamente en ocho canales, y recibida por un fotodiodo. El montaje descrito lo analizaron para 40km

de fibra. Para el *downstream* comprobaron que transmitían sin problemas hasta 1024 usuarios, sin embargo, para el *upstream* consiguieron transmitir a 32 usuarios en 25km.

De los modelos propuestos hemos elegido los tres primeros para realizar un análisis de simulación más amplio a nivel físico, pues algunos de ellos siguen el montaje típico de las arquitecturas TWDM PON estandarizadas y el último de ellos presenta una arquitectura novedosa en este tipo de redes. Este análisis se realizará en la plataforma de simulación OptSim, y se presentará en los siguientes capítulos.

## 2.10 Introducción a la plataforma de simulación OptSim

OptSim® [20] es una herramienta software desarrollada por el grupo RSoft para el diseño y simulación de sistemas de comunicaciones ópticas a nivel de propagación de la señal. OptSim está disponible comercialmente desde 1998 y su uso está muy extendido en la actualidad, tanto en el ámbito académico como el industrial. Con las técnicas de simulación más actuales e instrumentos de medida semejantes a los de un laboratorio experimental, esta herramienta proporciona una gran precisión, y su interfaz es muy sencilla y fácil de usar. Las características principales de OptSim son las siguientes:

- Cuenta con una herramienta de diseño con múltiples motores de aplicación que implementan cualquier arquitectura de enlace óptico, con una simulación precisa y eficiente, tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia.
- Incluye interfaces con herramientas de terceros, como MATLAB que facilita el desarrollo de modelos personalizados por el usuario, utilizando el lenguaje de archivos “m” y/o el entorno Simulink®modeling. Algunas interfaces disponibles cuentan con el equipo de pruebas de laboratorio, como Agilent y Luna, y combinan la simulación con el experimento.
- Modelado avanzado con motor eléctrico incorporando SPICE.
- Tiene una interfaz de programación de aplicaciones para el desarrollo de modelos de usuario personalizados, en lenguajes de programación como C/C++.
- Incluye una amplia biblioteca de componentes predefinidos.

OptSim se utiliza para el diseño por ordenador de sistemas de comunicación óptica que incluyen las siguientes aplicaciones, aunque no está limitado solo a estas:

- Sistemas de comunicación óptica coherente, tales como PM-QPSK, PM-BPSK, PM-QAM, OFDM.
- Formatos de modulación avanzada, tales como DPSK, BPSK, etc.
- Sistemas DWDM/CWDM con amplificación óptica EDFA, SOA, Raman, OPA.
- Sistemas FTTH/PON: BPON, GPON, WDM-PON, PON coherente, etc.
- Sistemas analógicos y digitales de televisión por cable o radio sobre fibra.
- Sistemas OCDMA/OTDM.
- Compensación de la dispersión electrónica (EDC, *Electronic Dispersion Compensation*).
- Interconexiones ópticas.

Este programa resultará de gran utilidad en el estudio de las arquitecturas ópticas que se simularán en este trabajo, debido al fácil manejo del programa y a la biblioteca de componentes predefinidos de los que dispone. Esto permite aprender a manejar las características fundamentales del programa en poco tiempo, y poder aplicarlo evitando el uso de material experimental mucho más costoso.

## 2.11 Conclusiones

En este capítulo se han repasado las características fundamentales de las redes PON, con especial interés en las redes de siguiente generación. De las propuestas presentadas por otros autores parece que se quiere por encima de todo reducir costes en las ONUs empleando láseres DFB sintonizables con la temperatura y además modulados directamente. La modulación directa tiene ventajas e inconvenientes frente a la modulación externa. La modulación externa parece la mejor porque no introduce *chirp* a los pulsos, mientras que la directa sí, pero las pérdidas son mucho mayores en la externa y habría que compensarla con más potencia en los amplificadores. Por eso muchos autores optan por modular la señal de manera directa, con diversas técnicas de compensación del *chirp*, entre las que destaca la introducción de un interferómetro de retardo. En cuanto a la amplificación las mejores prestaciones se dan con un EDFA, pues se pueden obtener ganancias superiores a los SOA con un nivel de ruido más bajo. Sin embargo, resultan más caros por lo que si no es necesario se usan los SOA (o los RSOA).

# 3 Simulación enfocada al incremento de la tasa de transmisión de datos

## 3.1 Introducción

En este capítulo se describe la arquitectura planteada por Ajibodu [16], realizado con el programa de simulación OptiSystem. Además, se planteará el diseño y simulación con la plataforma OptSim y se comentarán los resultados comparándolos con los del artículo.

En este artículo pretenden aumentar la tasa de transmisión de datos para cortas distancias, que pueden darse por ejemplo en los campus universitarios. La fibra óptica necesaria en este caso sería inferior a 10km, por lo que se podrían modificar las recomendaciones de la ITU para las redes TWDM PON. Esto permitiría a los usuarios conectarse con tasas de transmisión de bits mayores. Se realiza un estudio sobre la tasa de bits que puede soportar el sistema en función de la distancia a la que se quiera llegar, para un grupo de usuarios reducido, en concreto 16. Al no querer abarcar una gran cantidad de usuarios, que introducirían más pérdidas al sistema con el consiguiente empeoramiento de la señal, este sistema no necesita de amplificadores. Este es un punto a favor pues se conseguiría un abaratamiento de los costes. En dicho análisis, solo se centran en estudiar el canal de bajada, aunque el montaje se podría extender al de subida manteniendo la forma y cambiando la longitud de onda de transmisión.

## 3.2 Descripción del montaje de la arquitectura propuesta

En esta arquitectura se propone emplear 4 láseres de emisión continua en la banda L, con frecuencias comprendidas entre 187,5 y 187,8THz con una separación de 0,1THz. Estas señales se juntan mediante un multiplexor y se hacen pasar por un modulador Mach-Zehnder (MZ), para evitar introducir *chirp* (ver Figura 12). Esta señal es modulada mediante el uso de un PRBS y un generador de pulsos eléctricos NRZ. Esta secuencia de pulsos se conecta con el modulador para generar la secuencia óptica deseada. A continuación, la señal es conducida por una fibra óptica monomodo y finalmente es

dividida por un divisor óptico o *splitter* de razón 1:16 para que llegue a todos los usuarios. Mediante un filtro sintonizable, se selecciona la longitud de onda deseada que es detectada por un receptor. El resto de parámetros de simulación utilizados se muestran en la Tabla 4. Cabe destacar que la resolución de la Figura 12 no se ha podido mejorar, pues en el artículo original dicha resolución era demasiado mala.

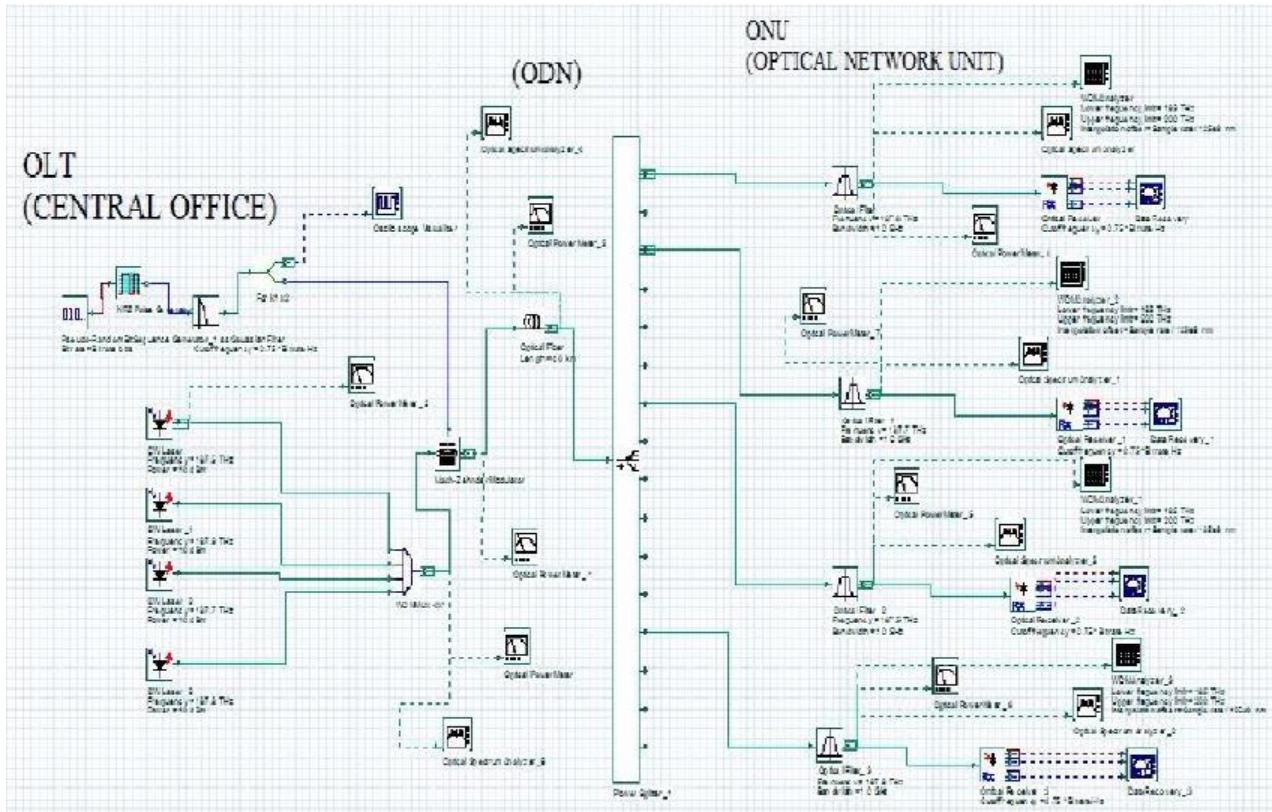


Figura 12. Montaje propuesto por Ajibodu [16]

Longitud de la secuencia de bits	$2^7 = 128$
Pérdidas del modulador	5dB
Extinction ratio del MZ	30dB
Tipo de fibra	Monomodo
Pérdidas de la fibra	0,2dB/Km
Pérdidas en el splitter 1:16	14dB
Potencia de cada láser	10dBm

Tabla 4. Parámetros de simulación

Además de los parámetros de la Tabla 4, la tasa de bits de cada canal la incrementan a partir de 10Gb/s reduciendo la distancia hasta obtener un BER aceptable de  $10^{-9}$ . Esto lo simulan hasta una distancia mínima de 10km, que es la que se podría usar para los campus universitarios, por ejemplo.

### 3.3 Montaje y análisis de los resultados en OptSim

En un intento de reproducir el artículo con el programa de simulación OptSim, se realizó el montaje de la Figura 13, con los parámetros anteriores. Se emplearon cuatro láseres de emisión continua con las longitudes de onda citadas anteriormente y se utilizó un combinador en lugar de un multiplexor para juntar los cuatro canales en uno solo. Mediante un PRBS a 10Gb/s y un NRZ, se realizó la modulación externa en un Mach Zehnder. A continuación, se propaga la señal por una fibra monomodo, en cuyo extremo se usó un *splitter* sin pérdidas, pero se le añadieron mediante un atenuador. Al añadir las pérdidas a parte, en realidad es como si se hubiera dividido la señal en 16 canales, aunque ya no es necesario colocar más que cuatro receptores para analizar las cuatro longitudes de onda. El receptor consiste en un filtro con el que seleccionar la longitud de onda, seguido de un fotodiodo PIN. La señal de la salida del fotodiodo es la que se emplea para analizar la señal.

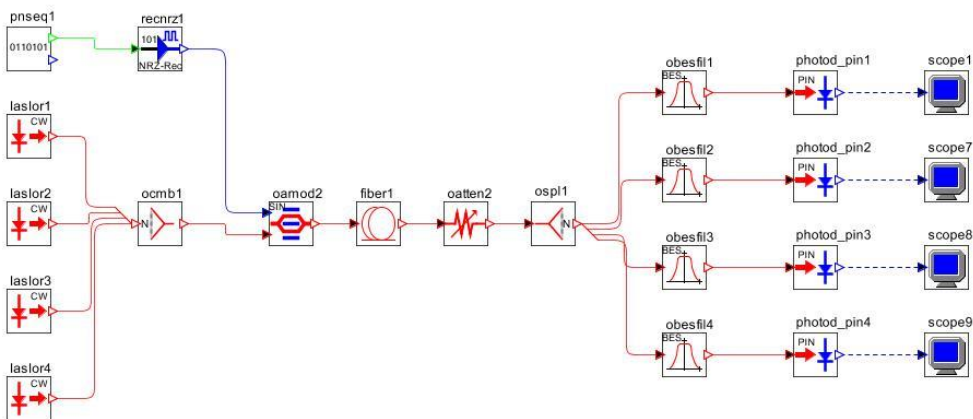


Figura 13. Montaje de la primera simulación.

Además de los parámetros de la Tabla 4, hay otros que no se comentan en el artículo o que no dejan claro, por lo que se han fijado para obtener resultados parecidos a los del artículo. Uno de ellos ha sido poner los filtros en forma de función de Bessel con una anchura de 10GHz. Otro parámetro importante del que no dicen nada es la anchura espectral del láser, por lo que se ha optado por dejarlo por defecto, es decir, a 10MHz.

Con este montaje final en OptSim se estima la máxima distancia que puede soportar el sistema para tasas de transmisión de 40, 44, 48 y 52Gb/s. La máxima distancia soportada para tener un BER aceptable, en función de la tasa de transmisión se compara con los resultados del artículo en la Figura 14. Las discrepancias entre los resultados del análisis comparativo de esta figura, se deben principalmente a los parámetros elegidos que no se revelan en el artículo. De todos modos, se ha conseguido un comportamiento similar, que muestra un empeoramiento de la señal con respecto a la tasa de transferencia de bits. En este sentido, para distancias cortas entre el OLT y las ONUs, se podría optar por transmitir a mayor tasa de bits de la que marca el standard de la ITU (de 40Gb/s). Esto supondrá un importante incremento de velocidad, cuando se requieran aplicaciones de transmisión de datos en tiempo real. Sin embargo, siguiendo las tasas de transmisión agregadas soportadas por el estándar (40Gb/s), la red puede soportar distancias de 50km, lo cual es un buen resultado.

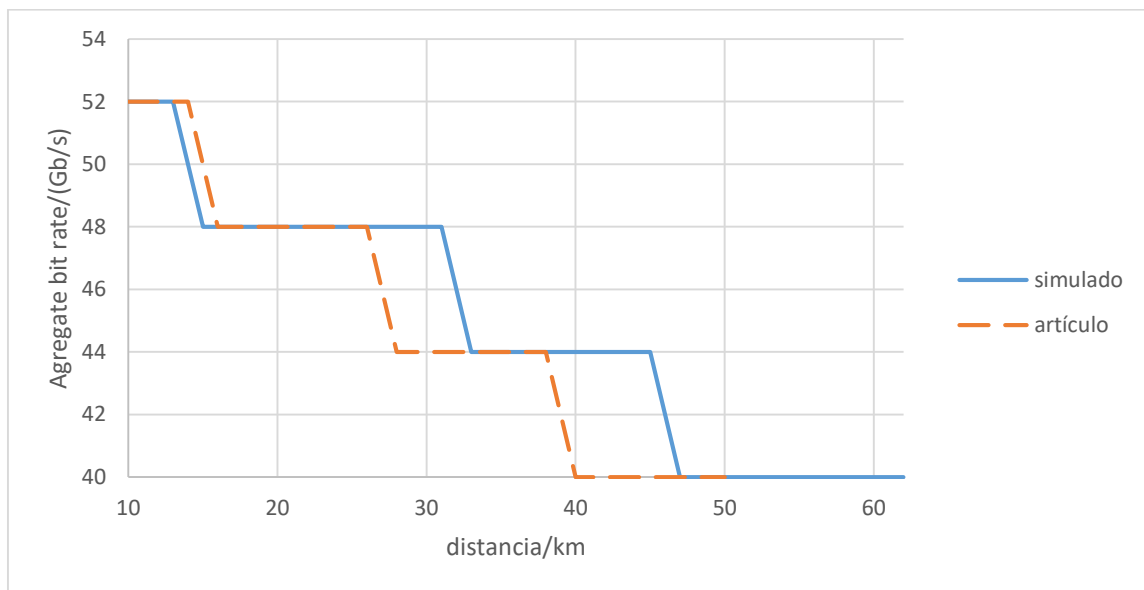


Figura 14. Tasa de transmisión de bits en función de la distancia

Adicionalmente se analizó el mismo montaje, pero colocando unos filtros de Bessel con anchuras diferentes, en concreto, se realizó con 25GHz. Se notó una gran mejora de la señal, indicando que ésta se había filtrado en exceso con la anchura de los filtros a 10GHz (ver Tabla 5). La tendencia sigue siendo a decrecer la distancia al aumentar la tasa de bits, pero ahora no lo hace tan rápidamente. En este caso, para la máxima tasa de bits estudiada en el artículo (52GHz), la distancia entre OLT y ONUs alcanzaría los 39km, por lo que estaríamos hablando distancias estipuladas por el estándar NG PON2, pero con tasas de transmisión más altas de los 40Gb/s habituales.

Tasa de bits/Gb/s	Tasa de bits total/Gb/s	Filtros de Bessel a 10GHz	Filtros de Bessel a 25GHz
		Distancia/Km	Distancia/Km
13	52	14	39
12	48	32	46
11	44	46	56
10	40	62	70

*Tabla 5. Comparativa de resultados con filtros de Bessel a 10 y 25GHz*

Para analizar cómo queda el espectro al ser filtrado por ambos tipos de filtros, se analizó el espectro antes y después del filtro para el caso de 10Gb/s a la máxima distancia en cada caso. En la Figura 15 b) se puede ver el filtrado a 25GHz de la frecuencia de 187,6THz, mientras que en la Figura 15 d) se puede ver el filtrado resultante a 10GHz para la misma frecuencia. Ambos filtros eliminan adecuadamente las frecuencias no deseadas, solo que el de 10GHz recorta demasiado la frecuencia deseada, y por ello se obtienen peores resultados en las simulaciones.



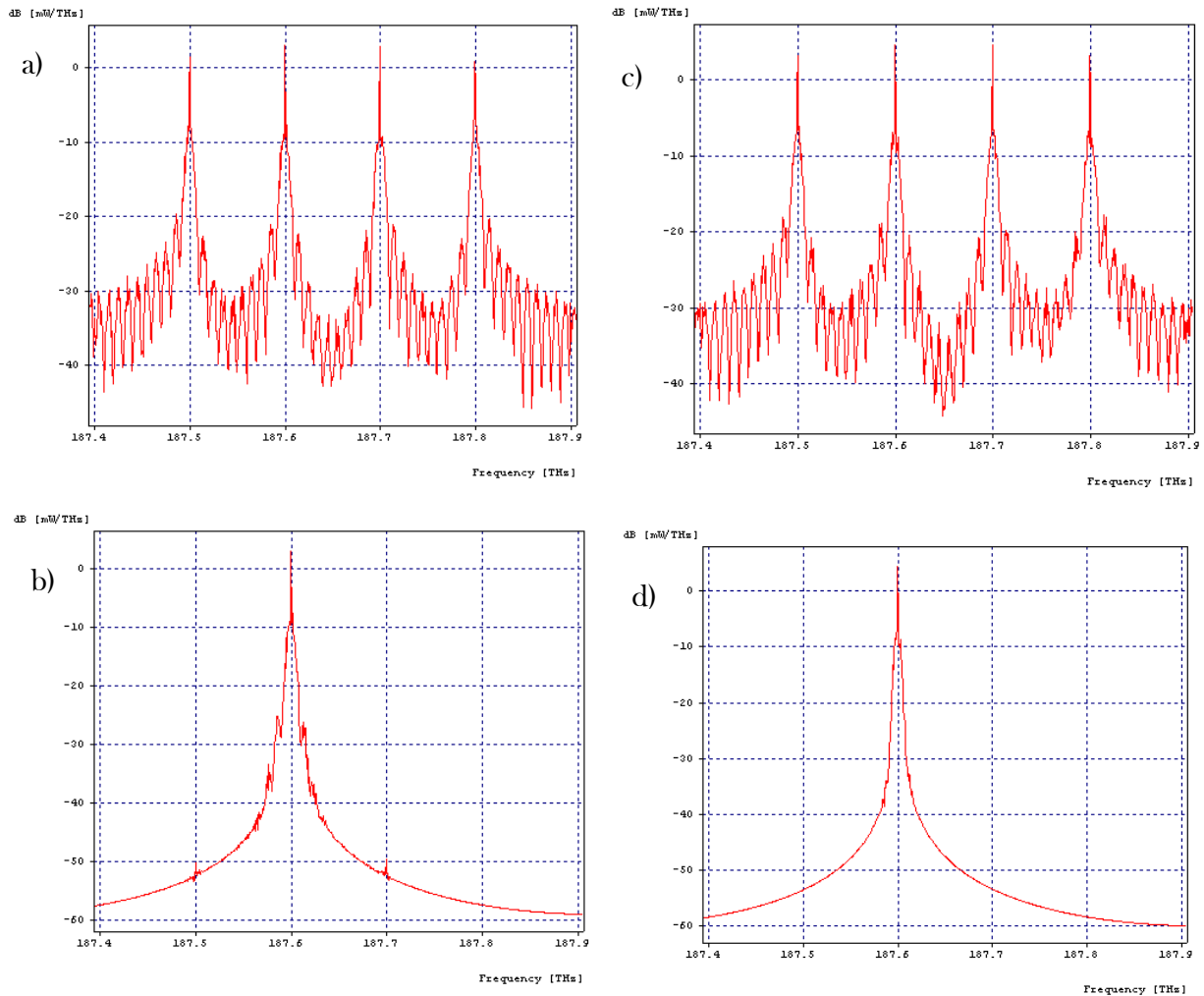


Figura 15. Análisis del espectro: a) y b) espectro antes y después del filtro de Bessel de 25GHz. c) y d) espectro antes y después del filtro de Bessel de 10GHz

### 3.4 Conclusiones

La arquitectura TWDM PON aquí propuesta es interesante para conocer las tasas de transmisión soportadas cuando la distancia requerida no es muy grande. Además, número de usuarios finales a los que está destinado este sistema es considerablemente bajo (solo 16 usuarios) y por ello puede funcionar sin amplificadores, lo que supone un ahorro significativo en su implementación. Las tasas de transmisión máximas de esta arquitectura llegan a 52Gb/s para distancias que rondan los 10km. Sin embargo, en un estudio posterior nosotros logramos mejorar los resultados, obteniendo para la misma tasa de transmisión distancias mayores (rondando los 40km). Según esto cabe pensar que los autores han elegido parámetros de simulación más restrictivos que los nuestros, y habría que esperar a ver lo que muestran los resultados en una arquitectura real.

# 4 Simulación de una arquitectura TWDM PON a 80Gb/s

## 4.1 Introducción

En este capítulo se describe la arquitectura realizada por Bindhaiq [18], realizado con el programa de simulación OptiSystem. Dicha propuesta se diseñará y simulará en la plataforma OptSim y se comentarán los resultados comparándolos con los originales del artículo.

La ITU prevé un aumento de la tasa de transmisión de bits para la NG PON2, mediante el uso de cuatro longitudes de onda más, lo que supondría tasas de 80Gb/s. En este artículo modelizan estos requerimientos mediante el uso de 8 láseres, cada uno transmitiendo a 10Gb/s. Se propone que se aprovechen de esta arquitectura 512 usuarios a una distancia de hasta 50km de la OLT. Por ello se hace necesario el uso de amplificadores, encargados de mejorar la señal. Los autores optan por utilizar un SOA para pre-amplificar la señal de cada ONU, mejorando así la sensibilidad del receptor.

## 4.2 Descripción de la arquitectura TWDM PON

Los autores proponen emplear ocho láseres DFB de emisión continua, con longitudes de onda situadas en la banda L, comprendidas entre 1570,4 y 1576nm con una separación de 0,8nm (unos 100GHz) y una potencia de salida de 10dBm. Estos láseres son modulados externamente mediante un interferómetro Mach Zehnder, para evitar introducir *chirp* (Figura 16). El modulador es alimentado por un PRBS de 10Gb/s y longitud de secuencia de bits de  $2^{31}$ , seguido de un NRZ. Los ocho canales se unen mediante un multiplexor y se transmiten a través de una fibra óptica monomodo de 50km y atenuación de 0,2dB/km. Al final de la fibra se encuentra un *splitter* de razón 1:512 para distribuir la señal a cada ONU. Mediante un filtro sintonizable se selecciona la longitud de onda deseada y se amplifica mediante un SOA para mejorar la señal antes de ser detectada por un fotodiodo PIN. Las pérdidas de cada componente se muestran en la Tabla 6.

Además, aunque no lo dice implícitamente el artículo, el modulador debe de tener unas pérdidas de 6dB.

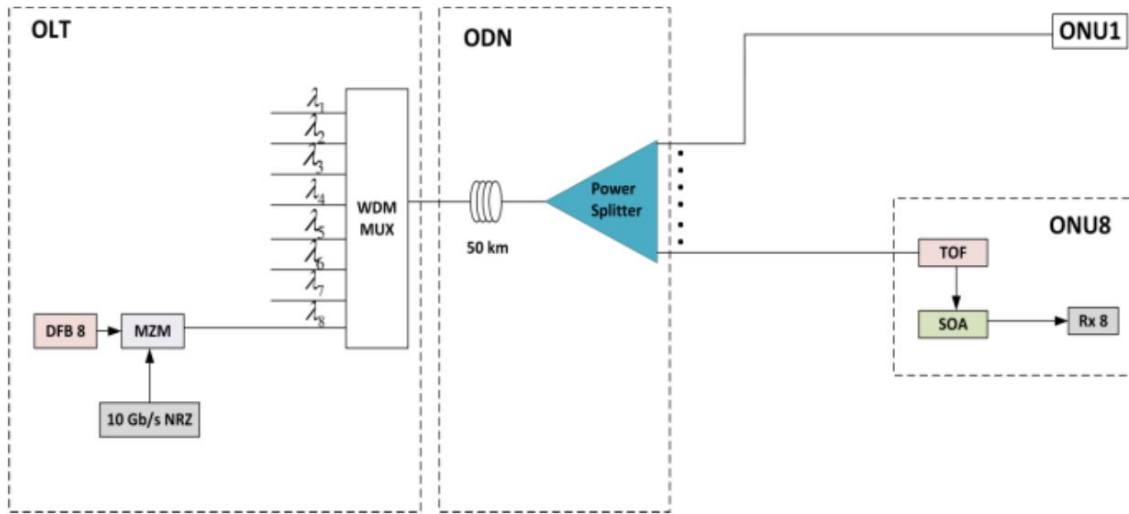


Figura 16. Arquitectura simulada por Bindhaiq [18]

Componente	Pérdidas
Multiplexor	4dB
Fibra (en 50km)	10dB
Splitter	27dB
Filtro	3dB

Tabla 6. Pérdidas de cada componente del montaje.

Los resultados obtenidos en el artículo son los mostrados en la Figura 17. En ella se puede ver que para que todas las longitudes de onda tengan una señal aceptable ( $BER = 10^{-9}$ ), la potencia que le debe llegar al receptor es de -28dBm. Además, la diferencia de potencia entre las ocho longitudes de onda es de unos 2dBm.

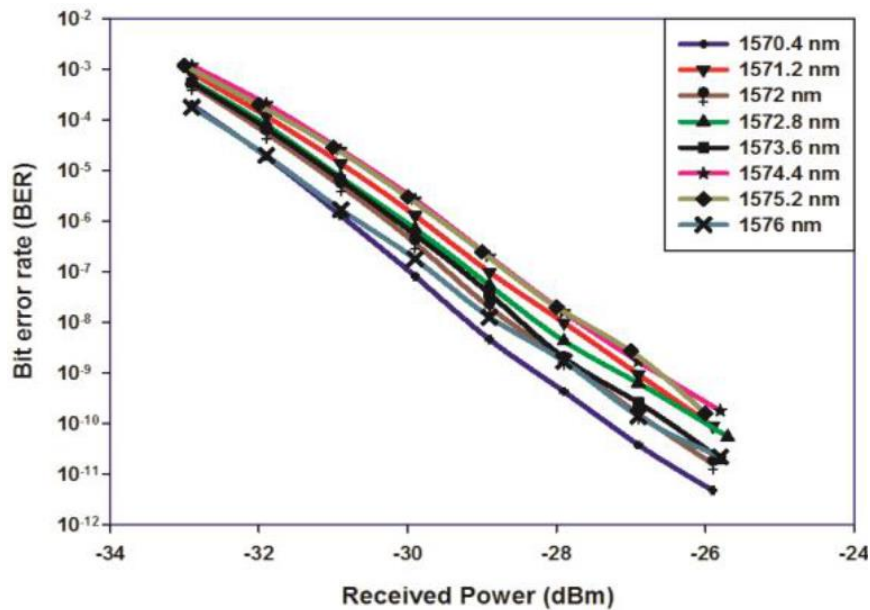


Figura 17. Potencia recibida por el receptor en función del BER en el artículo [17].

### 4.3 Montaje y análisis de resultados en OptSim

Una vez analizada y descrita la arquitectura, se procedió a simularla con OptSim. Sin embargo, aún quedan algunos parámetros que no se mencionan en el artículo y que hubo que fijar. En concreto, se tuvo que fijar la anchura del láser, la cual se dejó por defecto como en la simulación anterior a 10MHz. Los filtros seleccionados fueron de Bessel de anchura de 25GHz, pues a esa anchura se conseguían los mejores resultados que a otras. Además, el PRBS no se pudo seleccionar con una longitud de bits de  $2^{31}$  a causa de los límites del programa. Por eso se fijó en una longitud de bits de  $2^{20}$ , aunque esto no debería afectar en gran medida a los resultados. El resto de parámetros son los que se explicaron en el anterior apartado.

El montaje de la simulación puede verse en la Figura 18. En él, cada uno de los ocho láseres de emisión continua, se modula externamente. Esta modulación se realiza independientemente para cada canal, mediante una señal lógica procedente del PRBS, que es transformada en eléctrica en el NRZ y modula la señal óptica mediante un Mach Zehnder. Los ocho canales modulados se juntan mediante un combinador, son transmitidas por una fibra monomodo y divididas con un *splitter* entre los 512 usuarios. Las pérdidas del combinador y del *splitter* se introducen con un atenuador. Debido a esto, solo recogemos la señal de las ocho longitudes de onda, sin necesidad de incluir más

receptores. Los receptores constan de un filtro para seleccionar la longitud de onda (cuyas pérdidas simulamos con otro atenuador), un SOA para amplificar la señal y un fotodiodo PIN. Las pérdidas de cada componente son las mismas que las usadas en el artículo que se pueden ver en la Tabla 6.

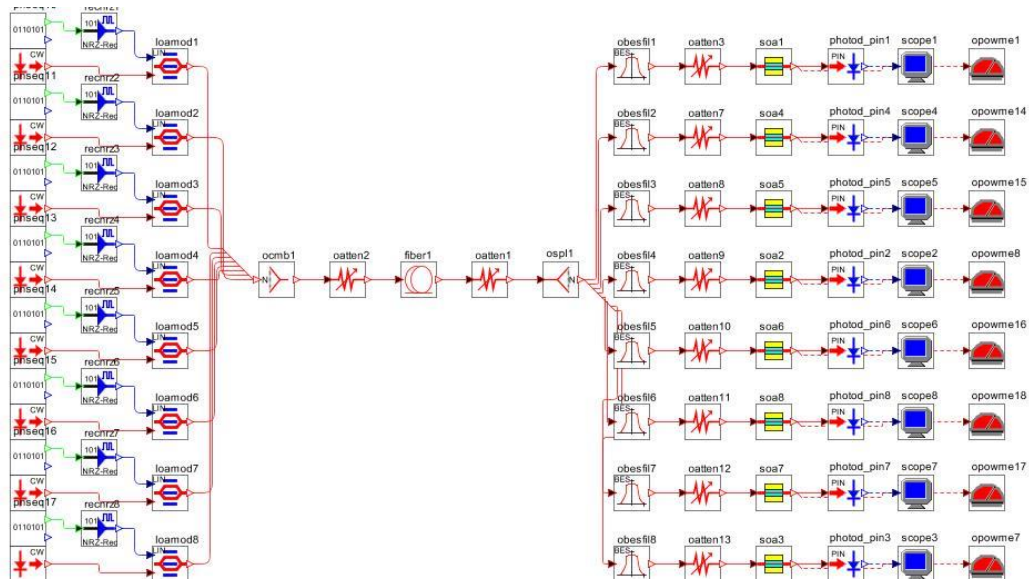


Figura 18. Montaje de la segunda simulación.

Modificando la ganancia del SOA, conseguimos variar la potencia que le llega al fotodiodo. Esta potencia la recogemos con un potenciómetro y medimos el BER obteniendo la gráfica de la Figura 19.

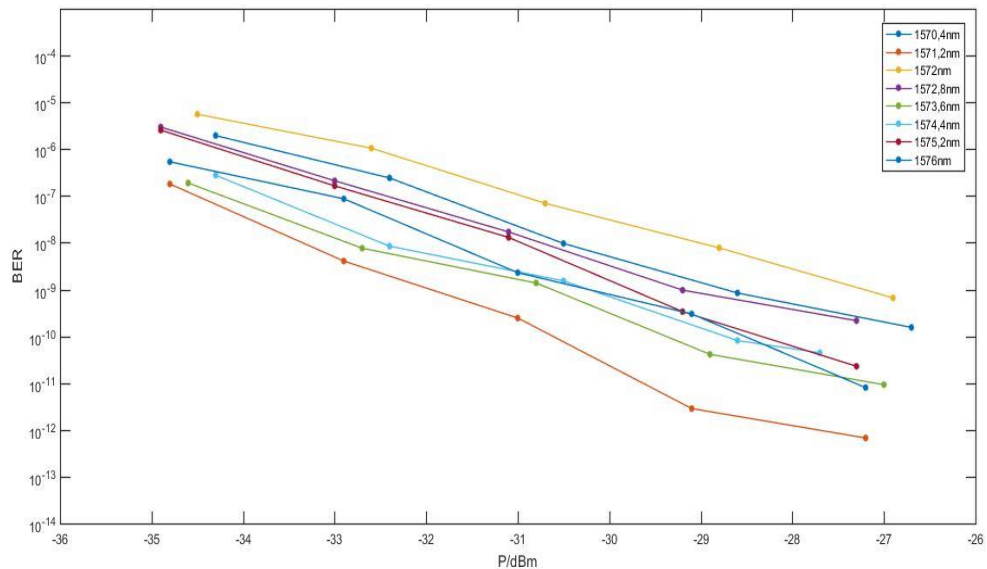


Figura 19. Potencia recibida en el receptor en función del BER, simulados en OptSim.

En este caso la potencia mínima para que al receptor le llegue una señal aceptable es de -27,5dBm, prácticamente la misma que en el artículo, siendo la ganancia del SOA de unos 11dB. Sin embargo, la diferencia de potencia entre las ocho longitudes de onda, en este caso es el doble que el obtenido por los autores del artículo. Esto puede ser debido sobre todo a variaciones provocadas en la secuencia de bits de cada canal.

También se puede observar que la pendiente del BER con la potencia que le llega al receptor es más pronunciada en los resultados del artículo que en los aquí simulados. Esto puede de estar relacionado con las características del SOA, pues no se sabe el ruido que introduce a la señal. Fijándose en los valores obtenidos por el artículo y en la simulación de OptSim se puede ver que para -33dBm hay tres órdenes de magnitud de diferencia. Nuevamente, ante la falta de más datos no se han podido llegar a resultados más parecidos con los del artículo. De todos modos, esta simulación es útil para conocer la sensibilidad del receptor, y dar un modelo para una ampliación de las tasas típicas de transmisión de 40Gb/s hasta 80Gb/s.

Para observar mejor algunos de estos conceptos, se recogió el espectro antes y después del filtro para la longitud de onda de 1572,8nm (Figura 20 a y b) y el diagrama de ojos en el caso límite en que el BER valía  $1 \times 10^{-9}$  (Figura 21 ).

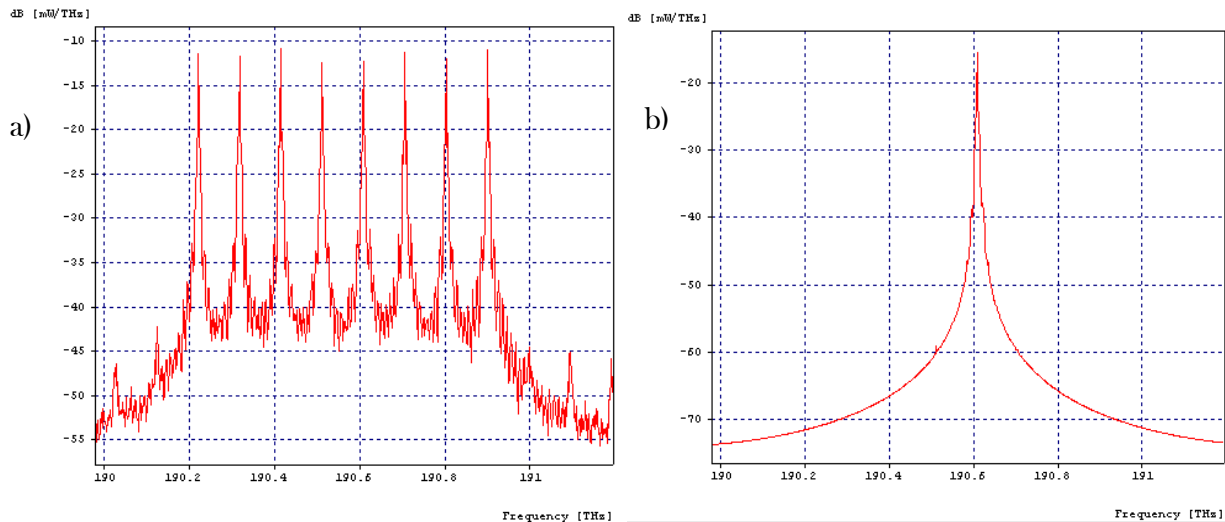
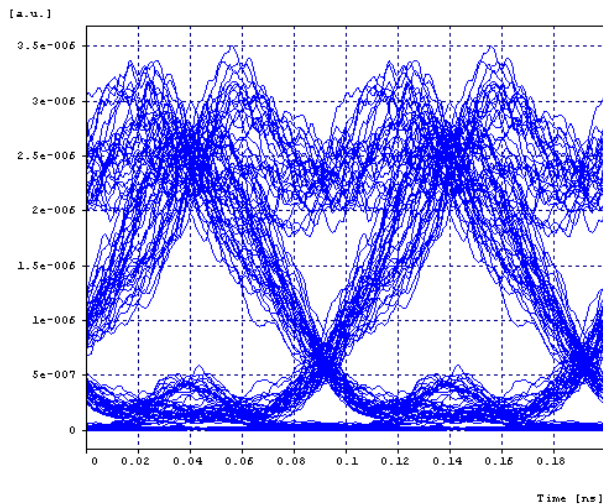


Figura 20. Espectro recogido antes a) y después b) del filtro



*Figura 21. Diagrama de ojos de la señal a 1572,8nm*

Se puede observar en la Figura 20 que el filtrado elegido es bueno, ya que selecciona perfectamente la longitud de onda deseada. En la Figura 21 se aprecia que ya empiezan a aparecer distorsiones en la señal cuando se tiene una tasa de error de bits al límite de lo recomendado. Sin embargo, a pesar de esas distorsiones la señal recibida es lo suficientemente clara para ser interpretada correctamente.

## 4.4 Conclusiones

En este capítulo se ha analizado una arquitectura TWDM PON que trabaja con 8 longitudes de onda diferentes para alcanzar una tasa de transmisión de datos de 80Gb/s. Este sistema será útil en un futuro no muy lejano, debido al aumento cada vez mayor en la demanda de altas velocidades de transmisión de datos. El sistema descrito es capaz de abastecer a 512 usuarios en 50km, lo que ya simula un sistema real dentro de las recomendaciones de la ITU. Los resultados obtenidos en OptSim por nosotros corroboran los resultados del artículo en gran medida, pues se consigue una buena transmisión de la señal para la misma potencia recibida por el receptor. Sin embargo, se obtienen desviaciones en los resultados, a causa del desconocimiento de la totalidad de los parámetros de simulación.

# 5 Simulación de una arquitectura TWDM PON con remodulación en la señal de subida

## 5.1 Introducción

En este capítulo de la memoria se describe la arquitectura planteada por Choudhary [19], con el programa de simulación OptSim. Este programa tiene dos modalidades de funcionamiento. Una, llamada “sample mode”, es la que se ha usado hasta ahora para las anteriores simulaciones, y que se caracteriza por funcionar realizando la transformada de Fourier discreta en sus cálculos. La otra es llamada “block mode”, que es la que se usa en este artículo en concreto, y se caracteriza por realizar la transformada rápida de Fourier. Además, los dos modos de trabajo tienen componentes diferentes, que serán usadas en esta simulación. En este capítulo se analizará el montaje descrito por el autor para más tarde implementarla nosotros en dicho programa. Para poder comparar mejor los resultados, se realizará también en el “block mode” de OptSim.

En dicho artículo se propone una estructura WDM-TDM híbrida, en la que se reutiliza la señal del *downstream* para generar otra señal en el *upstream*. De este modo, las ONUs no tendrían que estar equipadas con láseres y por tanto reducir costes. Por ello emplean las mismas longitudes de onda para el canal de subida que para el de bajada. Esto supondría tener que utilizar dos fibras en lugar de una sola, una para el sentido de subida y otra para el de bajada. Los autores realizan un estudio sobre el número de usuarios que puede soportar este sistema variando la longitud de la fibra. Además, observan que la misma arquitectura puede soportar más usuarios añadiendo un amplificador en el *downstream*.

## 5.2 Descripción de la arquitectura propuesta

El montaje realizado por los autores puede verse en la Figura 22. Se utilizan 4 láseres de emisión continua con longitudes de onda entre 1550,12nm y 1547,72nm, con una separación de 100GHz y emitiendo a 1mW de potencia pico. Un PRBS emite cuatro secuencias bits con tasas de 10Gb/s cada una. Estas señales pasan por un generador de



señal eléctrica NRZ que modulan la señal óptica mediante un modulador externo Mach-Zhender. Las señales de salida se juntan mediante un multiplexor y son conducidas mediante una fibra óptica monomodo con pérdidas de 0,3dB/km, seguida de un EDFA de 30dB de ganancia. La señal es entonces demultiplexada para separar cada longitud de onda y se transmite por otra fibra de 1km hasta las ONUs. Allí la señal se vuelve a dividir con un *splitter* a un número determinado de usuarios, que compartirán la misma longitud de onda. Una de las señales de la salida del *splitter* es extraída mediante otro *splitter* 1:2, siendo una parte de la señal recibida por el receptor y la otra parte es remodulada en intensidad a 10Gb/s.

Para simular el sentido de subida, las señales del *upstream* son multiplexadas y transmitidas por una fibra con post amplificación de 13dB de ganancia. La señal es demultiplexada en los cuatro canales y dividida entre los receptores del mismo modo que ocurría en el *downstream*.

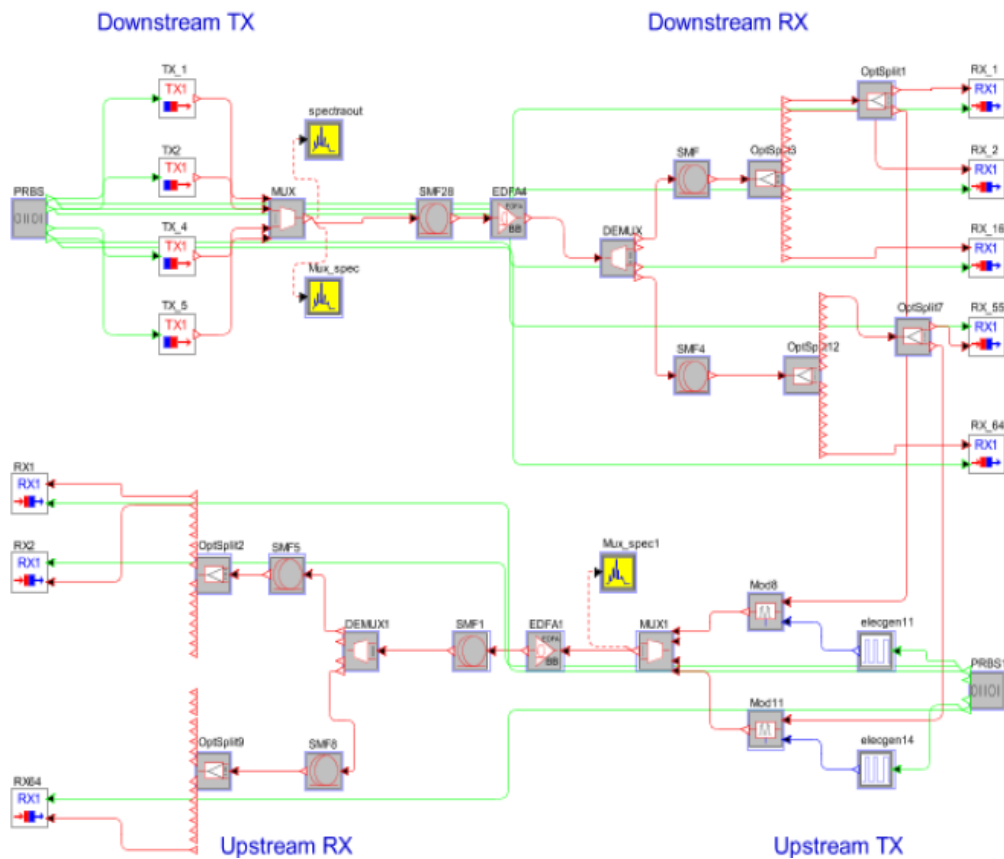


Figura 22. Arquitectura simulada por Choudhary [19]

Con este montaje consiguen transmitir señal a 64 usuarios en 32km. Además, al añadir otro EDFA en el *downstream*, consiguieron incrementar el número de usuarios hasta 1024 para unos 35km.

## 5.3 Montaje y análisis de nuestros resultados

Lo primero que se hizo fue replicar en OptSim el mismo montaje de la Figura 22. Antes de añadir el segundo EDFA en el *downstream* los resultados obtenidos fueron mejores que los del artículo. Sin embargo, al añadirlo la señal que llegaba a los receptores ya era muy buena y no mejoraba más. El problema se localizó en falta de potencia para el *upstream*.

Por todo esto, se modificó ligeramente el montaje para poder analizar las prestaciones de una estructura similar (Figura 23). Nuestro montaje consiste en cuatro láseres de emisión continua con las longitudes de onda propuestas por los autores. La modulación se realiza en un Mach Zehnder mediante un PRBS de 10Gb/s, seguido de un generador de pulsos eléctricos NRZ. Los cuatro canales son multiplexados y transmitidos por una fibra óptica monomodo seguida de un EDFA con una ganancia de 30dB. A continuación, se separan cada una de las longitudes de onda mediante un demultiplexor. Cada una de esas cuatro señales se transmite por 1km de fibra monomodo y se divide entre un grupo de usuarios mediante un *splitter* utilizándose la mitad de esa señal para la remodulación. Para la remodulación se empleó nuevamente un Mach Zehnder alimentado por un PRBS a 10Gb/s y un NRZ. Una vez multiplexados los cuatro canales se transmiten por otra fibra monomodo seguida de un EDFA de ganancia variable. La señal es recogida del mismo modo que en el *downstream*.

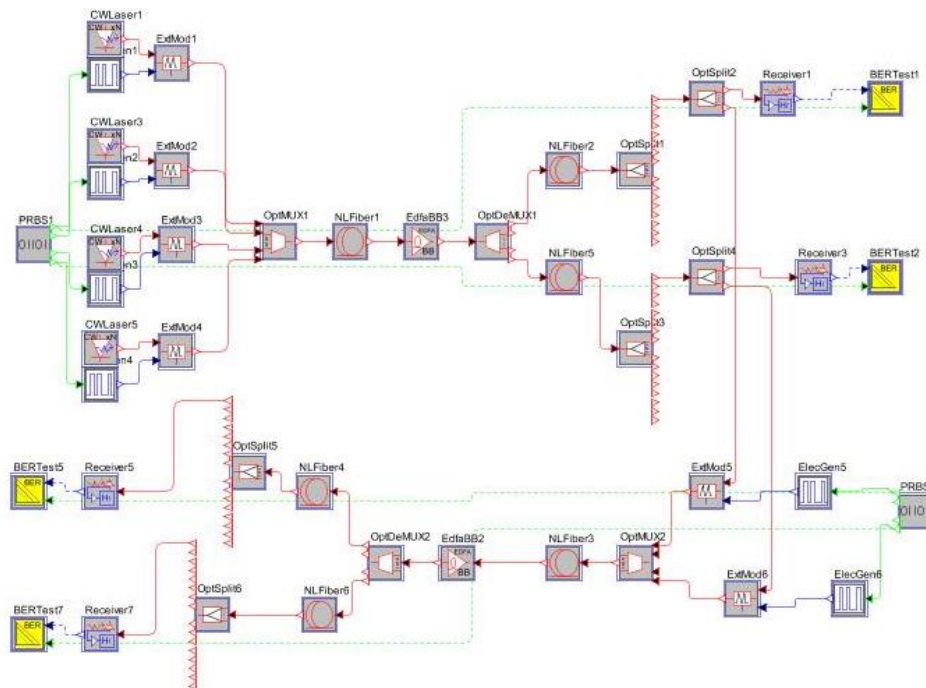


Figura 23. Arquitectura simulada por nosotros.

Las diferencias respecto a la arquitectura original se basan básicamente en la colocación del EDFA en el canal de subida. Éste se colocó después de la fibra para que esté situado en la OLT, y se modificó la ganancia en vez de dejarla fija, por la falta de potencia detectada en los receptores. Además, la remodulación no se especifica cómo la realizan en el artículo, solo se dice que es en intensidad. Por ello se decidió utilizar un Mach Zehnder. El segundo amplificador que utilizaban en el *downstream* para ampliar el número de usuarios, no se consideró necesario colocarlo porque no se detectó falta de potencia.

Con ese montaje se varió la longitud de la fibra entre 20 y 40km y la ganancia del EDFA del *upstream* entre 20 y 35dB, y se recogieron los datos para los que el BER era bueno ( $10^{-9}$ ). Estos resultados se pueden ver en la Tabla 7.

Nº de usuarios	Ganancia del EDFA del upstream/dB	Distancia/Km
256	20	40
1024	25	24
1024	30	35
1024	35	44
2048	30	20
2048	35	30

Tabla 7. Datos obtenidos de la simulación

Con esta arquitectura propuesta se puede ver que aumentar la ganancia del EDFA del *upstream* es clave para poder hacer llegar la señal a un mayor número de usuarios. Si la ganancia del EDFA del *upstream* es de 20dB se podría llegar a transmitir la señal hasta 256 usuarios en 40km. Si la ganancia es aumentada a 35dB podría llegar a 1024 usuarios en 44km o a 2048 en 30km. Aumentar más la potencia no sería muy buena idea puesto que se agudizarían los efectos no lineales en la fibra que harían empeorar la señal. En el artículo, sin embargo, el análisis realizado era distinto. Fijaban la ganancia del amplificador del *downstream* a 30dB, y el del *upstream* a 13dB. Con ello conseguían hacer llegar la señal a 64 usuarios en 32km. Para ampliar este número introducían un segundo amplificador en el *downstream*, del que se desconoce su ganancia, y mejoraban los resultados hasta 1024

en 35km. Por lo tanto, en nuestro modelo hemos logrado mejorar ligeramente estos resultados.

Para ilustrar los resultados, en la Figura 24 se muestra el diagrama de ojos para la señal de 1550,12nm en las ONUs (a) y en la OLT (b), así como el espectro de esa longitud de onda recibido en la ONU (c) y en la OLT (d). Estos resultados son obtenidos para 35km de fibra y 30dB de ganancia del EDFA del *upstream* para 1024 usuarios.

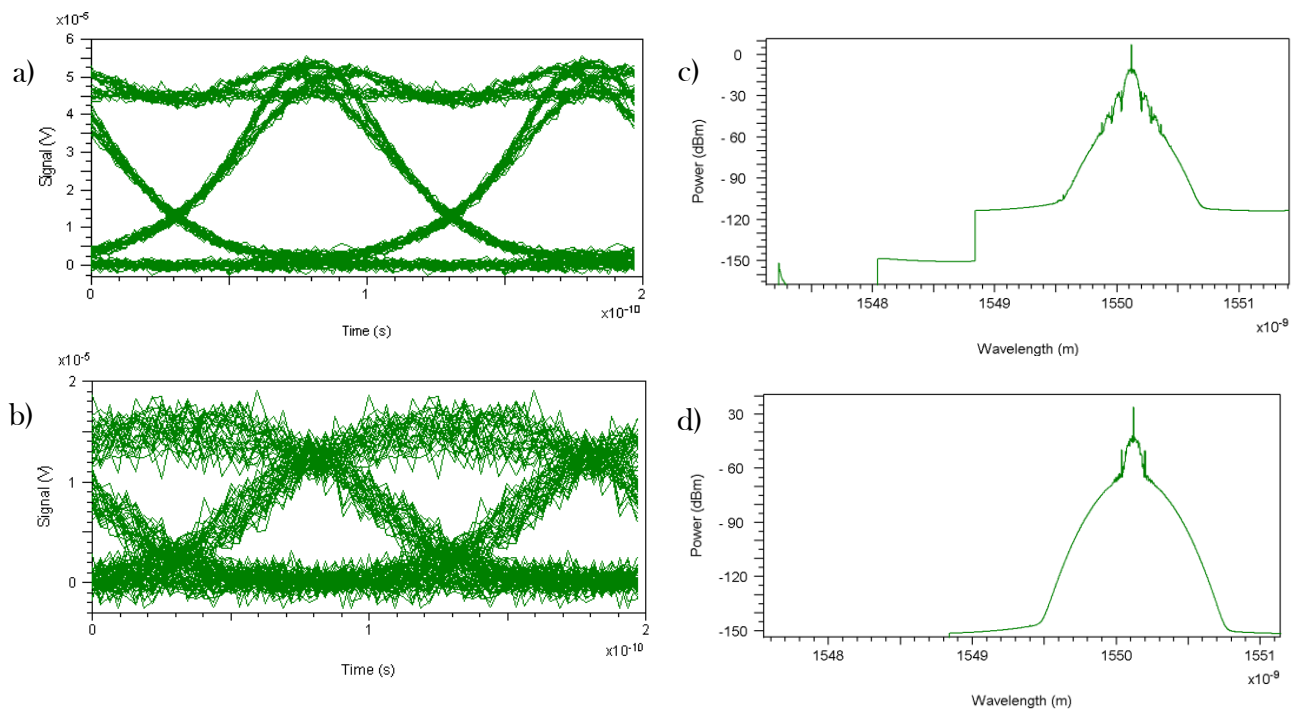


Figura 24. Diagrama de ojos y espectro para la longitud de onda 1550,12nm en la ONU a), c) y en la OLT b), d)

De la figura se aprecia que, mientras que el diagrama de ojos del *downstream* aún sigue siendo muy bueno, el del *upstream* ya presenta ciertas distorsiones en la señal. Esto justifica la elección de modificar la ganancia del EDFA del sentido de subida, y no colocar otro en el de bajada como hace el artículo. Además, en la figura se ve que el filtrado realizado por los demultiplexores es bueno, evitando tener que emplear filtros como se ha hecho en los artículos analizados en los dos capítulos anteriores.

## 5.4 Conclusiones

En este capítulo se ha descrito la propuesta de arquitectura TWDM PON de Choudhary, que simula un sistema con remodulación para la señal de subida. Este montaje tiene sus pros y sus contras. Al utilizar la remodulación se transmite con las mismas longitudes de onda para los sentidos de subida y de bajada, por ello habría que utilizar fibras diferentes para ambos sentidos. Además, por ser una arquitectura híbrida del tipo explicado en el apartado 2.5, no se podrían reutilizar las ODN existentes. Aun así, la idea de remodular la señal que le llega a los usuarios para evitar usar láseres es interesante pues descartaría el uso de láseres en las ONUs abaratando los costes. Otro punto a favor de esta arquitectura es que no hace falta emplear filtros, pues la selección de longitud de onda se realiza en el demultiplexor. Con esta arquitectura, en el artículo consiguen suministrar la señal a 1024 usuarios en 35 km. Nosotros sin embargo, hemos modificado el montaje propuesto a causa de una falta de potencia en el canal de subida, mejorando en cierta medida los resultados del artículo.

## 6 Conclusiones y líneas futuras de investigación

Para la implementación de las redes ópticas de siguiente generación NG PON2, se han propuesto arquitecturas basadas en TWDM PON. Esto supone incrementar la tasa de transmisión hasta 40Gb/s mediante el uso de cuatro longitudes de onda, o hasta 80Gb/s con ocho longitudes de onda en cada sentido de transmisión. Esta nueva tecnología requiere el uso un multiplexador para la combinación de éstas en la fibra monomodo, y de amplificadores para conseguir transmitir la señal a un mínimo de 64 usuarios (256 siendo un poco más restrictivos), en una fibra óptica de al menos 40km (distancias superiores a las de las redes actuales). Además, hasta ahora se empleaba modulación directa para obtener la secuencia de pulsos deseada. Al transmitir en con tasas superiores, los autores optan por el uso de modulación externa, o de diferentes métodos para corregir el *chirp* de los pulsos. La técnica más prometedora para compensar el *chirp* de la modulación directa parece ser la propuesta por Bi [12], el cual usa un interferómetro de retardo. Otra característica que aparece en esta nueva tecnología es la utilización de filtros sintonizables en las ONUs, debido al uso de varias longitudes de onda, que deben ser seleccionadas en cada momento por los receptores. Además, los transmisores de las ONUs también deberán estar preparados para transmitir en esas longitudes de onda con tiempos de respuesta muy cortos.

En este trabajo se han analizado diferentes arquitecturas de redes ópticas de siguiente generación bajo el programa de simulación OptSim. Estas arquitecturas están basadas en las propuestas por otros autores, las cuales se han intentado reproducir. No siendo posible en su totalidad, se ha optado por modificar dichas arquitecturas con el fin de darle otro punto de vista a las propuestas.

En la primera arquitectura analizada logramos transmitir la señal mediante cuatro láseres alcanzando tasas de 52Gb/s en una fibra de 39km, para un grupo reducido de usuarios (en concreto 16), en donde no hubo falta emplear amplificadores, pues la potencia necesaria la obtuvimos haciendo que los láseres transmitieran a 10dBm. Esto supone que en zonas donde se requiera y para pocos usuarios, se podrá disfrutar de una

velocidad de transmisión de datos muy superior a la marcada por el estándar, para aplicaciones donde las comunicaciones en tiempo real sean necesarias.

En la segunda arquitectura analizada conseguimos tasas de transmisión de 80Gb/s empleando ocho láseres en una fibra de 50km para 512 usuarios. Las compañías de telecomunicaciones pretenden eliminar Oficinas Centrales (donde se encuentran las OLT), para ahorrar en el mantenimiento de las mismas. Para ello es necesario establecer comunicaciones entre OLT y ONUs a distancias cada vez mayores. En ese sentido, en esta propuesta se lograría esto para un número de usuarios y unas tasas de transmisión de datos por encima de las recomendaciones de la ITU, lo cual es una propuesta bastante interesante.

En la tercera arquitectura simulada se utilizó la tasa de transmisión de datos habitual, de 40Gb/s empleando 4 longitudes de onda en cada sentido. Sin embargo, esta arquitectura es un tanto particular, pues utiliza remodulación de la señal del *downstream* para producir otra en el *upstream*. De este modo, se evita la necesidad del uso de láseres en las ONUs, abaratando los costes. En la propuesta planteada por nosotros se logra transmitir la señal satisfactoriamente a 1024 usuarios en 35km, utilizando un EDFA en el *downstream* y otro en el *upstream* con ganancias de 30dB, aunque dependiendo de la ganancia del EDFA del *upstream* es posible encontrar otras combinaciones.

Las líneas futuras de investigación que surgen de este trabajo a partir de las arquitecturas propuestas, consistirían en proponer nuevas arquitecturas NG PON2, con la finalidad de ser simples, que alcancen al mayor número de usuarios y con un abaratamiento de los costes. También habría que tener en cuenta simulaciones con modulación directa, para probar las técnicas de compensación del *chirp* que mejor resultados den. Una vez realizado este análisis, se podría plantear experimentalmente alguna simplificación para corroborar los resultados. De este modo lograríamos un análisis completo de las redes NG PON2, del que obtendríamos la arquitectura idónea en relación calidad precio que se ajuste a los requerimientos de la ITU.

# Referencias

- [1] S. Bindhaiq et al. *Optical Switching and Networking* 15 (2015) 53–66
- [2] B. Lund “PON architecture 'futureproofs' FTTH” (1999) *Lightwave*, 16 (10)
- [3] G. Pesavento “PONs for the broadband local loop” (1999) *Lightwave*, 16 (10)
- [4] H.S. Abbas et al. *Journal of Network and Computer Applications* 67 (2016) 53–74
- [5] M.A. Elmagzoub et al. *Optik* 125 (2014) 6194–6197
- [6] ITU-T, G.989.1, 2013. 40-Gigabit-capable passive optical networks 2 (NG-PON2). General requirements
- [7] ITU-T, G.989.2, 2014. 40-Gigabit-capable passive optical networks 2 (NG-PON2): Physical media dependent (PMD) layer specification
- [8] D. Nasset *Journal of Lightwave Technology*, 2015 vol. 33, no. 5 1136-1143
- [9] Y.Luo et al. *Journal of Lightwave Technology* (2013) vol. 31, no.4 587-593
- [10] Y. Guo, S. Zhu, G. Kuang, Y. Yin, Y. Gao, D. Zhang, and X. Liu, "Demonstration of 10G Burst-Mode DML and EDC in Symmetric 40Gbit/s TWDM-PON over 40km Passive Reach," in *Optical Fiber Communication Conference*, OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2014), paper Tu2C.6.
- [11] L.Yi *IEEE Photonics Technology Letters* 2013;25 644–647
- [12] M. Bi et al. *Optics Express* 2014 6925-6233
- [13] H.Zhao et al. “Chirp-Compensated DBR Lasers for TWDM-PON Applications” *IEEE Photonics Journal* 2015 vol. 7, no.1
- [14] S. Bindhaiq et al. *Optical Fiber Technology* 30 (2016) 65–71
- [15] P.Iannone et al. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, vol. 35, no. 7, 1328-1332
- [16] F.A. Ajibodu, B.A. Ojo *American Journal of Engineering Research* (2016), vol-5, issue-12, 104-109.
- [17] <https://optiwave.com/category/products/system-and-amplifier-design/optisystem/>



- [18] S. Bindhaiq et al. IEEE 5th International Conference on Photonics (2014), 69-71
- [19] Neelam Choudhary, Dr.Sanjay Pawar “Design and implementation of bi-directional 4 × 10 Gb/s WDM-TDM PON with upstream remodulation” IEEE Bombay Section Symposium 2015
- [20] <https://optics.synopsys.com/rsoft/rsoft-system-network-optsim.html>
- [21] Y.-Y. Sung “Symmetric 4x25-Gbit/s TWDM-PON Transmission by Using Spectrum Reshaping” 2016 21st OptoElectronics and Communications Conference (OECC) held jointly with 2016 International Conference on Photonics in Switching (PS).
- [22] <http://www.vpi Photonics.com/index.php>
- [23] V. Kachhatiya Optical Fiber Technology (2016) 32, 71-81