

DISEÑO DE UNA TÉCNICA DE MODULACIÓN ÓPTICA BASADA EN OFDM
QUE PERMITA LA MIGRACIÓN A REDES DE TIPO NG-PON2



NICOLÁS COSME FERNÁNDEZ
JUAN CAMILO PABÓN RIVAS

Tesis de Pregrado en Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones

Director(a)
GUSTAVO ADOLFO GOMEZ AGREDO
M.Sc en Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones

Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Popayán, Marzo, 2020

NICOLAS COSME FERNÁNDEZ
JUAN CAMILO PABÓN RIVAS

DISEÑO DE UNA TÉCNICA DE MODULACIÓN ÓPTICA BASADA EN OFDM
QUE PERMITA LA MIGRACIÓN A REDES DE TIPO NG-PON2

Tesis presentada a la Facultad de Ingeniería
Electrónica y Telecomunicaciones de la
Universidad del Cauca para la obtención del
Título de Ingeniero Electrónico y de Telecomunicaciones

Titulo de pregrado en:
Programa de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones

Director(a):
Gustavo Adolfo Gomez Agredo
con su máximo título académico

Popayán 2020

*La dedicatoria
es opcional
y puede ir en cualquier
lugar de la página.
Se sugiere usar
letras itálicas*

Agradecimientos

El autor agradece a las personas o instituciones que colaboraron en la elaboración del trabajo

Resumen estructurado

Antecedentes

Objetivos

Método(s)

Resultados

Conclusiones

Palabras clave

Structured abstract

Background

Aims

Method(s)

Results

Conclusions

Keywords

Contenido

Página de aceptación	III
Dedicatoria	V
Agradecimientos	VII
Resumen Estructurado	IX
Structured abstract	XI
Lista de figuras	XIV
Lista de tablas	XVII
1. MARCO TEÓRICO	1
1.1. Multiplexación	1
1.1.1. Multiplexación por División de Frecuencia	1
1.1.2. Multiplexación por División de Tiempo	3
1.1.3. Multiplexación por División de Código	5
1.1.4. Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales	8
1.2. Redes de Fibra Óptica	17
1.2.1. Beneficios de las redes ópticas vs las redes eléctricas convencionales	17
1.2.2. Topologías de redes ópticas	17
1.2.3. Mecanismos de reparto de la señal de información óptica	18
1.2.4. Estructura y funcionamiento de una red PON	20
1.2.5. Canal ascendente y descendente en una red PON	21
1.3. Arquitecturas ópticas de nueva generación	22
1.3.1. Grupo FSAN	23
1.3.2. Estándares PON	24
1.3.3. Estándares NG-PON	26
2. MARCO METODOLÓGICO	35
2.1. Herramientas de simulación	35
2.1.1. MATLAB	35
2.1.2. OptSim	36

2.2.	Monitoreo de Rendimiento Óptico (OPM)	37
2.2.1.	Diagrama del Ojo	39
2.2.2.	Factor de calidad Q	40
2.2.3.	Tasa de Error de Bit (BER)	41
2.2.4.	Jitter	41
2.2.5.	Relación Señal a Ruido Óptica (OSNR)	42
2.3.	Metodología de Simulación	43
2.3.1.	Diagrama de Flujo de Simulación	45
2.4.	Definición del escenario de simulación	45
2.4.1.	Caracterización del entorno de simulación	46
2.4.2.	Entorno de simulación	47
Bibliografía		53
Anexo A		55

Lista de figuras

1.1. a) Los anchos de banda originales. b)Señales moduladas con subportadoras de diferente frecuencia. c) Canal multiplexado.[1]	2
1.2. Transmisión simultanea de 3 flujos de datos, mediante TDM.	3
1.3. (a) Secuencias de chips para cuatro estaciones. (b) Las señales que representan las secuencias. (c) Seis ejemplos de transmisiones. (d) Recuperación de la señal de la estación C.[1]	6
1.4. Diagrama conceptual de una Modulación/Demodulación con OFDM.[2]	12
1.5. Introduciendo un intervalo de guarda.[3]	13
1.6. Función de distribución acumulativa complementaria, P_c , para el PAPR de señales OFDM con números variables de subportadoras [2].	14
1.7. Función de distribución acumulativa complementaria para el PAPR de una señal OFDM con diversos factores de sobremuestreo. [2]	16
1.8. Topologías PtP y PtM de capa física PON.[4]	18
1.9. Mecanismos de reparto AON Y PON.[5]	19
1.10. Topología estándar PON.[6]	20
1.11. Canal Descendente PON.[6]	21
1.12. Canal Ascendente PON.[6]	22
1.13. Mapa de ruta de estándares, 2.0, FSAN (publicado en noviembre de 2016).[7]	24
1.14. Arquitectura de Red.[8]	27
1.15. Arquitectura de Referencia de Alto Nivel para XG-PON/XGS-PON[8]	28
1.16. Arquitectura de Referencia de la Red Acceso para XG-PON/XGS-PON[9]	29
2.1. Visión general de las diferentes deficiencias ópticas dentro de la red.[10]	39
2.2. Diagrama de Ojo para una señal binaria. a) Pulso ideal. b) Pulso real limitado en banda. c) Pulso real distorsionado.[11]	40
2.3. Relación entre la función de densidad de probabilidad y la tasa de errores en los bits.[12]	41
2.4. Diagrama de ojo con un desfase de 0.5 veces el periodo de bit.[13]	42
2.5. Diagrama de flujo empleado para llevar a cabo el modelo de simulación.	45
2.6. Escenario de simulación	48
2.7. Espectro Óptico de los 4 Canales.	49
2.8. Diagrama del Ojo del Canal 1.	49
2.9. Diagrama del Ojo del Canal 4.	50

Lista de Tablas

1.1. Tasas de transmisión de XG-PON[8]	29
1.2. Longitudes de Onda XG-PON1[8]	30
1.3. Niveles de Potencia para XG-PON1[14]	30
1.4. Perdidas de trayecto para XG-PON1[14]	31
1.5. Longitudes de Onda XG-PON2(XGS-PON)[9]	31
1.6. Niveles de Potencia para XG-PON2(XGS-PON)[15]	32
1.7. Perdidas de trayecto para XG-PON2(XGS-PON)[15]	32
1.8. Longitudes de Onda NG-PON2 con TWDM PON[16]	33
1.9. Longitudes de Onda NG-PON2 con PtP WDM[16]	33
2.1. Técnicas de simulación de la herramienta OptSim	36
2.2. Plan de Frecuencia de los 4 Canales	46
2.3. OPMs Back to Back	47
2.4. OPMs Back to Back	48
2.5. OPMs	50

Capítulo 1

MARCO TEÓRICO

1.1. Multiplexación

En las telecomunicaciones la multiplexación es básicamente un método mediante el cual múltiples señales analógicas o flujos de datos digitales son enviados a través de un solo canal. El principal objetivo de la multiplexación es el aprovechamiento de un recurso valioso como frecuencia y tiempo, para minimizar costos en infraestructura física, si no fuera de esta forma la cantidad de cables que serían necesarios para soportar cada señal sería inviable.

En la actualidad existen diversos esquemas de multiplexación que se han desarrollado a partir del aprovechamiento de diferentes recursos, esquemas de multiplexación FDM, TDM, CDM y OFDM.

1.1.1. Multiplexación por División de Frecuencia

Del inglés Frequency Division Multiplexing - FDM, es una tecnología analógica que consiste en la división del espectro en bandas de frecuencia. Las distintas frecuencias se asignan a distintos canales lógicos (estaciones), cada uno de los cuales opera en una parte del espectro, es decir que cada uno tiene asignado un ancho de banda adecuado al servicio, centrado en una frecuencia única; luego éstos se combinan debido a que no hay dos canales que ocupen la misma porción del espectro, para formar una única señal que es transmitida a través del medio (Cableado e inalámbrico). Por otro lado, cada canal cuenta con una Banda de guarda, que no es más que la separación entre canales, lo suficientemente grande como para evitar interferencias. [1]

La imagen a continuación permite visualizar el funcionamiento de una transmisión de múltiples señales de voz simultáneamente mediante el uso de FDM.

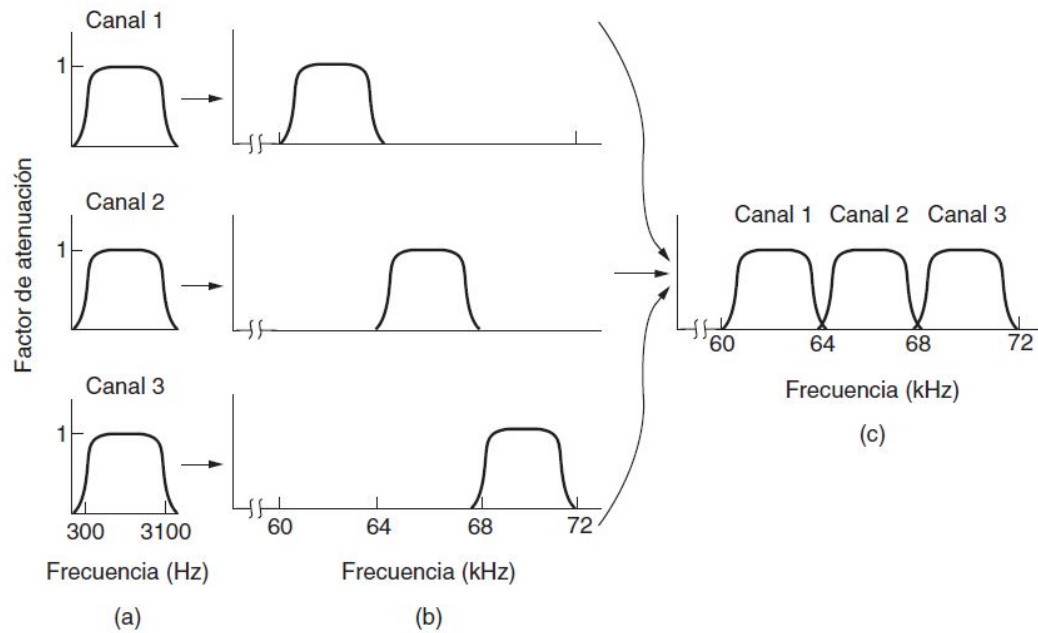


Figura 1.1: a) Los anchos de banda originales. b) Señales moduladas con subportadoras de diferente frecuencia. c) Canal multiplexado.[1]

En la figura 1.1 se observa un proceso donde primero se limitan las señales de información a un ancho de banda W mediante un filtro pasa banda, luego se modula cada señal a diferente frecuencia, esto hace que cada canal este desplazado en frecuencia con relación a los demás, permitiendo así la transmisión de una única señal, que es la combinación de todas las señales de información, lo que se conoce como un canal multiplexado.

Ventajas

- Tecnología de fácil implementación.
- Ancho de banda dedicado para cada usuario.
- Fuerte ante interferencias por canales adyacentes, si se supone una banda de guarda adecuada.
- Ancho de banda asignado de acuerdo al servicio (Voz, vídeo, datos).

Desventajas

- Gestión de recursos rígida y poco apta para flujos de datos variables.
- Requiere duplexor para transmisión duplex, es decir dos canales para establecer una comunicación de doble sentido.

- Ruido de intermodulación, para un enlace lo suficientemente largo, los efectos no lineales de los amplificadores sobre las señales en un canal, podrían producir componentes de frecuencia en otros canales.

Aplicaciones

Este esquema se ha utilizado para mutiplexar llamadas en el sistema telefónico durante muchos años, aunque ahora se prefiera más la multiplexación en el tiempo. Sin embargo, FDM se sigue utilizando en las redes telefónicas, así como en las redes celulares, redes inalámbricas terrestres y redes de satélites con un mayor nivel de granularidad.[1]

Más específicamente es usado en aplicaciones tales como:

- Redes de telefonía pública conmutada.
- Sistemas de radiodifusión AM y FM.
- Redes móviles de primera generación.
- Televisión satelital.

1.1.2. Multiplexación por División de Tiempo

Del inglés Time Division Multiplexing - TDM, es una tecnología digital donde los usuarios toman turnos (rotatorios tipo round-robin) y cada uno recibe periódicamente todo el ancho de banda durante una pequeña ráfaga de tiempo.[1]

La imagen a continuación permite visualizar el funcionamiento de una transmisión de múltiples flujos de datos simultáneamente mediante el uso de TDM.

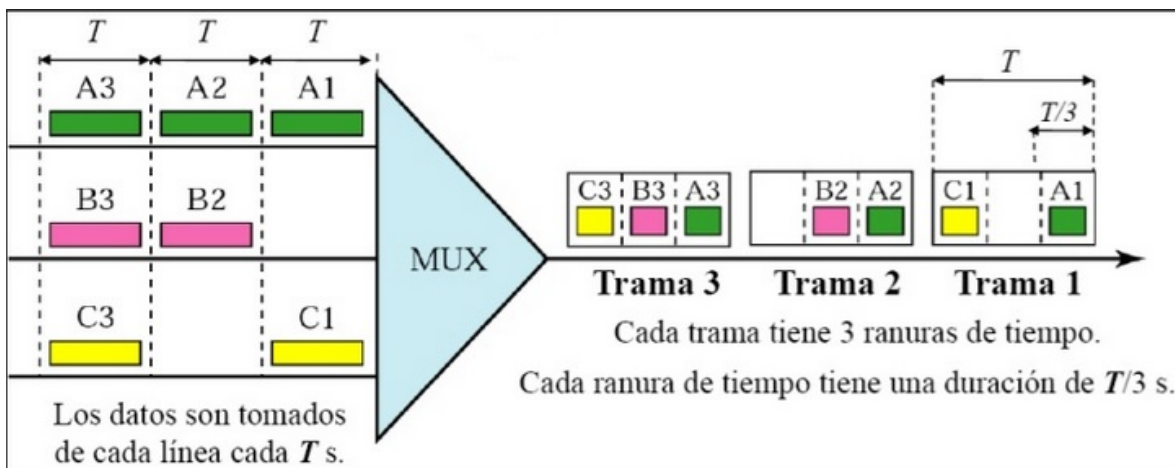


Figura 1.2: Transmisión simultanea de 3 flujos de datos, mediante TDM.

Esto se logra organizando el mensaje de salida en unidades de información llamadas tramas, y asignando intervalos de tiempo fijos (time slots) dentro de la trama a cada canal de entrada. De esta forma, el primer canal de la trama ó primer time slot corresponde a la primera comunicación, el segundo a la segunda, y así sucesivamente, hasta que el n-esimo más uno vuelve a corresponder a la primera. Las regiones de tiempo no usadas entre time slots se denominan tiempos de guarda, y tienen la finalidad de disminuir la interferencia entre señales adyacentes en el dominio del tiempo.

El uso de esta técnica es posible cuando la tasa de los datos del medio de transmisión excede de la tasa de las señales digitales a transmitir. El multiplexor por división en el tiempo muestrea, o explora cíclicamente las señales de entrada (datos de entrada) de los diferentes usuarios, y transmite las tramas a través de una única línea de comunicación de alta velocidad.[17]

Ventajas

- Tecnología de mediana complejidad, muy probada e implementada.
- Adecuada para la conmutación de paquetes.
- Cada canal en tiempo hace uso de la totalidad del ancho de banda disponible.
- Ausencia de distorsión por intermodulación.
- El problema de diafonía no es severo.

Desventajas

- Requiere de una estricta sincronización para su adecuado funcionamiento.
- No permite la transmisión de grandes grupos de canales manteniendo el periodo de trama, pues se necesitarían pulsos estrechos, que requieren un amplio ancho de banda.
- No es conveniente la transmisión de grandes grupos de canales aumentando el periodo de trama, pues el retardo para cada canal sería excesivo.

Aplicaciones

El TDM se utiliza mucho como parte de las redes telefónicas y celulares. Más específicamente en:

- Líneas telefónicas RDSI (Red Digital de Servicios Integrados).
- PSTN (Red Telefónica Pública Conmutada).
- Como TDMA (Acceso Múltiple por División de Tiempo.) en redes celulares 2G.

1.1.3. Multiplexación por División de Código

Hay un tercer tipo de multiplexión que funciona de una manera muy distinta a FDM y a TDM. CDM (Multiplexión por División de Código, del inglés Code Division Multiplexing) es una forma de comunicación de espectro disperso en la que una señal de banda estrecha se dispersa sobre una banda de frecuencia más amplia. Esto puede hacerla más tolerante a la interferencia, al tiempo que permite que varias señales de distintos usuarios compartan la misma banda de frecuencia. Como la multiplexión por división de código se utiliza la mayoría de las veces para este último propósito, se le conoce comúnmente como CDMA (Acceso Múltiple por División de Código, del inglés Code Division Multiple Access). CDMA permite que cada estación transmita en todo el espectro de frecuencia todo el tiempo. Las múltiples transmisiones simultáneas se separan mediante el uso de la teoría de codificación.

Para entenderlo mejor, se tomará la siguiente analogía: una sala de espera en un aeropuerto con muchas parejas conversando. Se puede comparar a TDM con parejas de personas en el cuarto que toman turnos para hablar. FDM es comparable a las parejas de personas que hablan en distintos tonos, algunas en tonos agudos y otras en tonos bajos, de tal forma que cada pareja puede sostener su propia conversación al mismo tiempo, pero de manera independiente a los demás. CDMA se puede comparar con cada pareja de personas que habla a la vez, pero en un lenguaje distinto. La pareja que habla francés sólo se concentra en el francés y rechaza todo lo que no sea francés, pues lo considera ruido. Así, la clave del CDMA es extraer la señal deseada mientras todo lo demás se rechaza como ruido aleatorio.

En CDMA, cada tiempo de bit se subdivide en m intervalos cortos llamados chips. Por lo general hay 64 o 128 chips por cada bit, pero con la finalidad de mostrar algunos ejemplos se utilizará 8 chips/bit. A cada estación se le asigna un código único de m bits, o secuencia de chip. Es conveniente usar una notación bipolar para escribir estos códigos como secuencias de -1 y $+1$. Mostraremos las secuencias de chip entre paréntesis. Para transmitir un bit 1, una estación envía su secuencia de chip. Para transmitir un bit 0, envía la negación de su secuencia de chip. No se permite ningún otro patrón. Así, para $m = 8$, si se asigna a la estación A la secuencia de chip $(-1 -1 -1 +1 +1 -1 +1 +1)$, para enviar un bit 1 transmite la secuencia de chip y para enviar un 0 transmite $(+1 +1 +1 -1 -1 +1 -1 -1)$. En realidad lo que se envía son señales con estos niveles de voltaje, pero es suficiente verlas en términos de las secuencias.

La acción de incrementar la cantidad de información a enviar de b bits/seg a mb chips/seg para cada estación significa que el ancho de banda necesario para CDMA es mayor por un factor de m que el ancho de banda necesario para una estación que no utilice CDMA (suponiendo que no haya cambios en las técnicas de modulación o de codificación). Si se tiene una banda de 1 MHz disponible para 100 estaciones, con FDM cada estación tendría 10 kHz y podría enviar a 10 kbps (suponiendo 1 bit por Hz). Con CDMA, cada estación utiliza el 1 MHz completo, por lo que la tasa de chip es de 100

chips por bit para dispersar la tasa de bits de la estación de 10 kbps a través del canal. [1]

La imagen a continuación permite visualizar el funcionamiento de 4 estaciones transmitiendo mediante CDM.

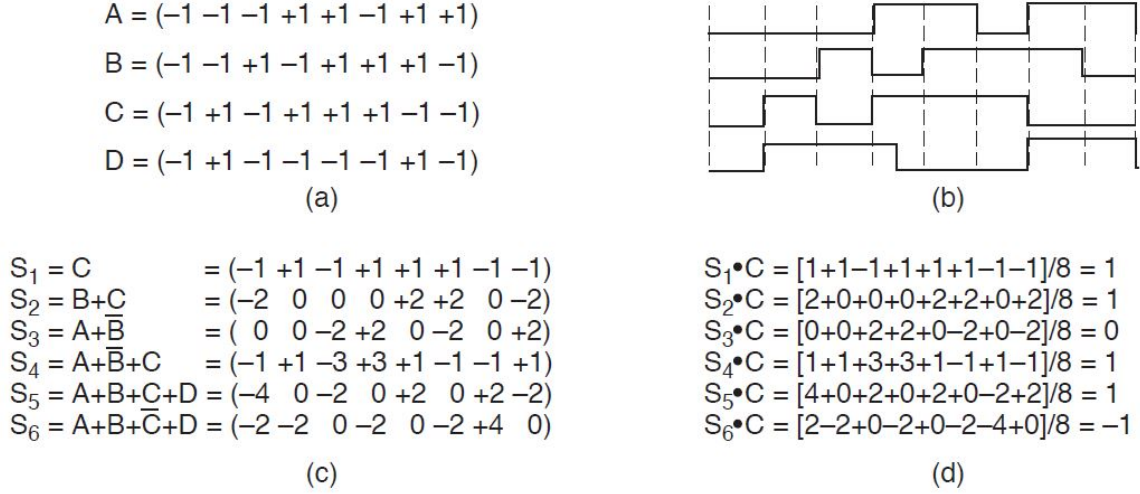


Figura 1.3: (a) Secuencias de chips para cuatro estaciones. (b) Las señales que representan las secuencias. (c) Seis ejemplos de transmisiones. (d) Recuperación de la señal de la estación C.[1]

En CDM inicialmente se le es asignada una única secuencia de chip a cada estación **(a)**, luego ésta es multiplicada por la señal de datos, teniendo en cuenta que para transmitir un bit = 0, se multiplicará por la misma secuencia pero negada. Ya obtenida la señal CDM **(b)**, en una transmisión simultanea por parte de las estaciones, lo que verá el receptor será la suma de todas las señales **S_n**, al ser señales bipolares, lo que se obtendrá es una secuencia como la que se observa en **(c)**, luego para recuperar los datos de una estación en particular, para el ejemplo de la imagen, la estación **C**; se debe hacer el producto interno normalizado entre la señal recibida y la secuencia única de la estación, así:

$$S_n \bullet C = \frac{1}{m} \sum_{i=0}^m (S_{n_i} C_i)$$

Tal como se observa en **(d)**, se recupera el bit transmitido por la estación **C**. Está forma de recuperar la información de una señal CDM es posible gracias a que todas las secuencias de chip son ortogonales por pares, lo que quiere decir que el producto interno normalizado de dos distintas secuencias de chip cualesquiera, S y T (lo que se escribe como **S•T**), es 0.

Ventajas

- Diversidad de frecuencia, dado que la transmisión es esparcida a lo largo de un ancho de banda más grande, impedimento de transmisión, dependientes de la frecuencia, tienen menor efecto sobre la señal.
- Resistencia al multitrayecto, ya que los códigos de secuencia de chips, tienen la propiedad de tener baja correlación y también baja auto-correlación, por lo tanto una versión de la señal que se ha retardado mas de un intervalo de chip no interfiere con la señal dominante en tanta proporción como en otros ambientes.
- Privacidad, como se utilizan señales similares a ruido en Espectro Ensanchado, la privacidad es inherente, es decir que si alguien sintoniza el canal de una comunicación establecida mediante CDM-CDMA, escuchará puro ruido, y como cada comunicación o usuario tiene asignado un código único, lo blindo ante interceptaciones.
- Como se trata de un sistema de espectro ensanchado, si el sistema no trabaja a plena carga (es decir, si trabaja con un número de usuarios menor al máximo permitido), un sistema CDMA puede no degradar otros sistemas ya existentes (TDMA, FDMA) y, por lo tanto, puede coexistir con ellos.
- Puede aplicarse a comunicaciones analógicas o digitales.
- Permite una elevada flexibilidad a la hora de cambiar los códigos asignados a cada usuario y la cantidad de recursos asignados (a cada usuario se le puede asignar uno, dos o más códigos, con lo que se consigue adaptar la velocidad de transmisión de cada usuario en relación con sus necesidades).
- Permite una elevada flexibilidad a la hora de decidir a qué usuario decodificar. Basta con que el receptor seleccione el código del usuario que quiere demodular para conmutar entre usuarios.

Desventajas

- Se necesita un control de potencia en los transmisores para evitar el efecto cerca-lejos (efecto near-far).
- Se requiere una precisión en la sincronización mayor incluso que en TDMA. Si no existiese sincronización alguna, no se sabría en que momento aplicar el código o secuencia de chips para recuperar la señal, obteniendo ruido.
- A pesar de permitir el uso completo del ancho de banda asignado, todo el tiempo, no es un sistema para soportar una gran cantidad de usuarios, pues cada nuevo usuario degradaría la calidad de los demás usuarios.
- Los códigos o secuencias que usan los diferentes usuarios no son perfectamente ortogonales entre si, generando así una posible interferencia.

Aplicaciones

Desarrollado para el cableado estructural residencial, para tráfico de voz y sistemas de seguridad, según los requisitos de las normas ANSI/TIA/EIA-570-B (Residencial de Telecomunicaciones Infraestructura Estándar) y ANSI/TIA/EIA-568B.2 (Balance Twisted Pair Cabling Componentes) con la función de distribución y control de los recursos de telefonía. También es empleado en múltiples sistemas de comunicación por radiofrecuencia, tanto de telefonía móvil (como IS-95, CDMA2000, FOMA o UMTS), transmisión de datos (WiFi) o navegación por satélite (GPS).

1.1.4. Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales

Historia de OFDM

El origen de la idea principal de OFDM fue desarrollado para el servicio militar en la década de los 50, trataba de resolver el problema del desvanecimiento multitrayecto que se daba en las comunicaciones por radio. Comenzó dividiendo el espectro disponible para transmitirlo en múltiples subportadoras.

Al comienzo, el principal problema era que la separación entre portadoras que se usaba para evitar el solapamiento era demasiado grande, lo que llevaba a un aprovechamiento ineficiente del espectro. Un primer intento para brindar la solución del problema fue el sistema Kineplex, desarrollado por Collins Radio Co., consistía en la división del espectro HF de radio en 20 tonos modulados por una 4-PSK diferencial sin filtros. No obstante, se usaba un pulso coseno alzado que se superponía demasiado, ya aparecía la primera similitud con el sistema OFDM moderno al dar una separación entre portadoras idéntica.

En el esquema propuesto por Collins Radio Co. la señal a transmitir se pasaba a un banco de circuitos sintonizados dispuestos de dos en dos, de forma que cada tono llegaba a un par distinto. Los símbolos entraban alternativamente por uno de los circuitos sintonizados donde eran almacenados hasta la llegada del siguiente, se calculaba la diferencia de fase y se transmitía la información.

Sin embargo, la primera publicación oficial de la modulación multiportadora fue realizada en 1966 en esta se describía un sistema de transmisión basado en la división multiportadora y la patente de “OFDM” en 1970, ambas publicaciones realizadas por R. W. Chang. Chang solucionaba el problema de solapamiento definiendo ciertas propiedades necesarias a los pulsos coseno alzado. Se limitó el espectro de cada señal de forma que sólo se solaparían con sus portadoras adyacentes, permaneciendo ortogonales entre ellas.

A diferencia del modelo no limitado en banda, en este, cada portadora llevaba una modulación QAM escalonada, la cuál era una modulación en amplitud normal sólo que las entradas I y Q del modulador debían llevar un offset por cada medio símbolo. Además, las portadoras adyacentes tenían un offset opuesto. La combinación de los filtros del transmisor y el receptor da como resultado un filtro Nyquist con un coeficiente roll-off menor que 1. De aquí en adelante los hitos históricos más destacados fueron:

- En 1971, Weinstein y Ebert proponen el uso de la modulación DFT, Discrete Fourier Transform, esta técnica consiste en la agrupación de N números complejos, uno por cada subcanal. A cada uno de estos bloques se le realizaba una transformada inversa DFT, transmitiendo la señal resultante. En el receptor se le aplicaba una DFT recuperando los datos originales. El uso de la DFT exigía reservar un intervalo de guarda entre portadoras para asegurar la no interferencia de subportadoras entre sí durante la transformación. A pesar de que el intervalo de guarda pueda parecer un desperdicio de capacidad, el cambio de tener N moduladores a sólo 1 implica una reducción de coste computacional muy importante que sin duda justifica su uso.
- En 1980, Peled y Ruiz propusieron usar el intervalo de guarda, hasta ahora vacío, para realizar una extensión cíclica de la señal, es decir, introdujeron el prefijo cíclico. Esto permitía realizar una convolución cíclica usando la DFT. Con este cambio podemos encontrar una versión de la modulación OFDM parecida a la de nuestros días.
- En 1985, Cimini en Bell Labs identifica muchas de las cuestiones clave en transmisión OFDM y hace una prueba de concepto de diseño realizando el primer esquema de OFDM moderno. En este se describía su uso para las comunicaciones móviles. También en este mismo año, MODEM Telebit Trailblazer fue incorporado usando un protocolo de ensamblaje de paquetes de 512 portadoras.
- En 1987, Alard y Lasalle, realizando una serie de estudios, decide proponer OFDM para difusión digital.
- En 1988, TH-CSF LER, diseña y realiza el primer enlace experimental de TV Digital con OFDM en el área de París.
- En 1993, DSL adopta OFDM, también llamado Discrete Multitone, tras las exitosas pruebas de campo frente a los sistemas basados en ecualizador, realizadas por Bellcore. Además, Morris realiza un enlace experimental de Wireless LAN usando OFDM en el que se alcanzan velocidades de 150Mbit/s.
- En 1995, la ETSI establece el primer estándar basado en OFDM, el DAB (Digital Audio Broadcasting, Emisiones Digitales de Sonido). Para prosperar dos años después al estándar DVB-T, consistente en la emisión de video digital.
- En 1997 OFDM se emplea en difusión de Internet con Línea de Suscriptor Digital Asimétrica (ADSL).
- En 1998, el IEEE, o Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos, comenzó su proceso de estandarización de nuevas tecnologías, en este caso con la OFDM.
- En 1999, el comité de IEEE 802.11 en redes LAN inalámbricas libera el estándar 802.11a OFDM para la operación en la banda 5GHz UNI.

- En 2002, el comité IEEE 802.16 libera emisiones OFDM basadas en un estándar para acceso inalámbrico de banda ancha para redes de área metropolitana en proceso de revisión 802.16a.
- En 2003 el comité IEEE 802.11 libera el estándar 802.11g para funcionar en la banda de 2,4 Ghz. También se desarrolla la norma para multibanda OFDM ultrawideband, mostrando la utilidad de OFDM en sistemas de baja relación entre la señal y el ruido.
- A partir del 2004 se han completado una serie de estándares con respecto a OFDM, conocidos como IEEE 802.16, que contemplan una gama muy amplia de especificaciones que están siendo constantemente adaptadas a las necesidades del mercado, y especialmente en el ámbito empresarial, adoptando así una característica flexible y adaptable en el tiempo.

Conceptos básicos de OFDM

OFDM es una clase especial de modulación multiportadora (MCM MultiCarrier Modulation), donde múltiples subportadoras llevan información en determinadas subbandas, compartiendo parte de su espectro, pero siendo diferenciables por propiedades de ortogonalidad. La idea general de esta técnica de transmisión es dividir el ancho de banda total disponible en múltiples subcanales de banda estrecha en frecuencias equidistantes. Los espectros de los subcanales se superponen entre sí, pero las señales de la subportadora siguen siendo ortogonales, permitiendo ser separadas en recepción.

El flujo único de datos de alta velocidad se subdivide en múltiples flujos de datos de baja velocidad para los subcanales. Cada subcanal es modulado individualmente y será transmitido simultáneamente en forma superpuesta y paralela. Por lo tanto, una señal de transmisión OFDM consiste de N_{sc} subportadoras adyacentes y ortogonales, separadas por la distancia de frecuencia Δf en el eje de frecuencia. Todas las señales subportadoras son mutuamente ortogonales dentro de la duración del símbolo de longitud T_s , si la distancia de la subportadora y la duración del símbolo se eligen de tal manera que $T_s = \frac{1}{\Delta f}$. Para sistemas basados en OFDM, la duración de símbolo, T_s , es mucho más grande, comparada con el máximo retardo multitrayecto τ_{max} . La k -ésima señal subportadora no modulada es descrita analíticamente por una función exponencial de valor complejo, con frecuencia portadora $k\Delta f$, $\tilde{g}_k(t)$, $k = 0, 1, \dots, N_{sc} - 1$. [18]

$$\tilde{g}_k(t) = \begin{cases} e^{j2\pi k \Delta f t} & \forall t \in [0, T_s] \\ 0 & \forall t \notin [0, T_s] \end{cases} \quad (1.1)$$

Concepto de Ortogonalidad

Existe ortogonalidad entre dos señales exponenciales complejas, limitadas en tiempo, siempre que la integral del producto de la primera por el conjugado de la segunda, para

su periodo fundamental, dé como resultado cero.[19] Es decir:

$$\frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} s_k s_i^* dt = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} e^{j2\pi f_k t} e^{-j2\pi f_i t} dt = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} e^{j2\pi(f_k - f_i)t} dt \quad (1.2)$$

$$= e^{j\pi(f_k - f_i)T_s} \text{Sinc}_N((f_k - f_i)T_s) \quad (1.3)$$

Se puede ver que si la condición:

$$f_k - f_i = m \frac{1}{T_s}, \quad \text{donde } m \in \mathbb{Z}^+ \quad (1.4)$$

es satisfecha, entonces las dos subportadoras son ortogonales entre sí; esto es debido a que la función $\text{Sinc}_{\text{Normalizada}}$, es nula o cero, si su argumento es un número entero, así:

$$\text{Si } arg \in \mathbb{Z} \quad \therefore \quad \text{Sinc}_N(arg) = 0 \quad (1.5)$$

haciendo que el resultado de la integral del producto sea igual a cero.[2]

Formulación matemática de la Modulación/Demodulación de una señal OFDM

Para la modulación, el transmisor OFDM mapea los bits mensaje en una secuencia de símbolos M-PSK o M-QAM, los cuales subsecuentemente serán convertidos en N_{sc} flujos paralelos. Cada uno de los N_{sc} símbolos de la conversión de serie a paralelo, se lleva a cabo por las diferentes señales subportadoras.[19] Entonces se tiene que la señal Multi-Portadora Modulada transmitida, $s(t)$ se puede representar matemáticamente como:

$$\begin{aligned} s(t) &= \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{N_{sc}-1} C_{ki} s_k(t - iT_s) \\ s_k(t) &= \Pi(t) e^{j2\pi f_k t} \\ \Pi(t) &= \begin{cases} 1, & (0 < t \leq T_s) \\ 0, & (t \leq 0, t > T_s) \end{cases} \end{aligned} \quad (1.6)$$

Donde C_{ki} es el i -ésimo símbolo de transmisión en la k -ésima subportadora, s_k la forma de onda para la k -ésima subportadora, N_{sc} el número de subportadoras, f_k la frecuencia de la subportadora, siendo $f_k = k\Delta f$, T_s el periodo de símbolo y $\Pi(t)$ la función de conformación de pulso, en donde $i = 0, 1, 2, \dots, \infty$ y $k = 0, 1, 2, \dots, N_{sc} - 1$. Se debe tener en cuenta que, debido a la conversión serie-paralelo, la duración del tiempo de transmisión para N_{sc} símbolos se extiende a $N_{sc}T_s$, formando un solo símbolo OFDM de duración T_{sym} (i.e., $T_{sym} = N_{sc}T_s$). En la demodulación, para recuperar el coeficiente de cada subportadora, se requiere una serie de filtros emparejados, que se encuentran correlacionados con la forma de onda de las subportadoras en transmisión, cancelando la forma de onda de la subportadora, dejando un coeficiente afectado por la respuesta al canal.[2] Para una mejor comprensión de lo anterior, se presenta a continuación un diagrama conceptual de la Modulación/Demodulación con OFDM:

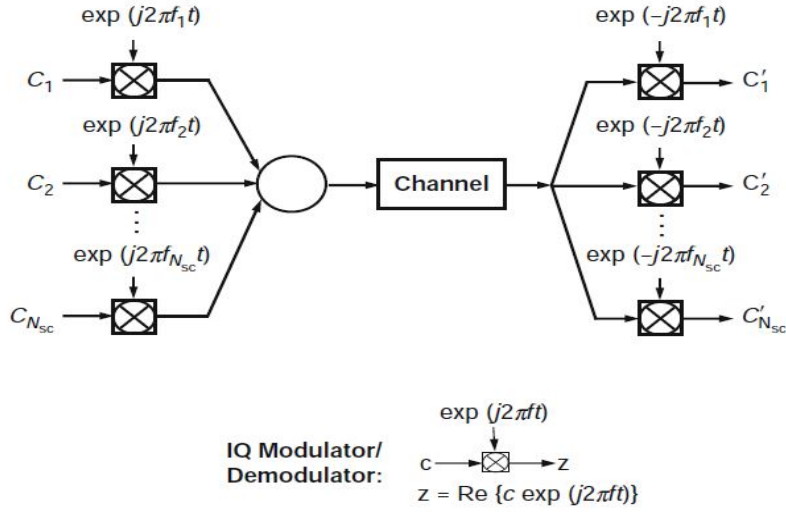


Figura 1.4: Diagrama conceptual de una Modulación/Demodulación con OFDM.[2]

Por lo tanto, el símbolo de información detectado c'_{ki} en la salida del filtro se puede expresar así:

$$c'_{ki} = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} r(t - iT_s) s_k^* dt = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} r(t - iT_s) e^{-j2\pi f_k t} dt \quad (1.7)$$

donde $r(t)$ es la señal recibida en el dominio del tiempo. Cabe resaltar que en la imagen 1.4, el conjunto de subportadoras exponenciales son ortogonales en frecuencia, esto significa, que con sus frecuencias espaciadas en múltiplos del inverso del periodo de símbolo, éstas se pueden recuperar con los filtros coincidentes en la ecuación (1.7); sin interferencia entre portadoras (ICI), a pesar de la fuerte superposición espectral de la señal.[2]

OFDM con intervalo de guarda

Hasta ahora, siempre se ha asumido una perfecta sincronización entre el transmisor y el receptor. En una canal multitrayecto con desvanecimiento selectivo en frecuencia, los desajustes de sincronización suelen ser significativos, porque cada componente de eco de la señal, es como si fuese una señal mal sincronizada, generando, en consecuencia, que los pulsos básicos de la señal OFDM original y la versión retardada de la señal ya no sean ortogonales.[3] Esto conduce a una severa interferencia entre símbolos (ISI) en tiempo y frecuencia también porque a la salida del receptor se encuentra, para la frecuencia k y para el símbolo i , una señal eco retardada, de la siguiente forma:

$$r_\tau(t - \tau) \quad \text{donde} \quad 0 < \tau < T_s \quad (1.8)$$

Contribuyendo a que exista una ISI en todas las subportadoras de frecuencia, para los símbolos en el intervalo de tiempo iT_s e $(i - 1)T_s$. Esta propiedad, que es una

consecuencia de la pérdida de ortogonalidad debido a la superposición de componentes espectrales, aparentemente descalificaría a OFDM como una técnica útil en un canal multitrayecto. Existe, sin embargo, un simple truco que modifica la señal de transmisión, de tal manera que la ortogonalidad se conserve de cierta manera, aunque se esté en presencia de componentes de señal multitrayecto.

La idea es introducir un intervalo de guarda (a veces llamado prefijo cíclico). Al hacer esto, el símbolo se extenderá cíclicamente desde la onda armónica original de período T_s , agregando un intervalo de guarda de duración Δ , para convertirse en un armónico de la misma frecuencia y fase, pero de duración $T = T_s + \Delta$. Como se podrá apreciar a continuación en la Figura 1.5, esto significa que copiamos un trozo de longitud Δ desde el final del símbolo y lo pegamos delante de la señal.[3]

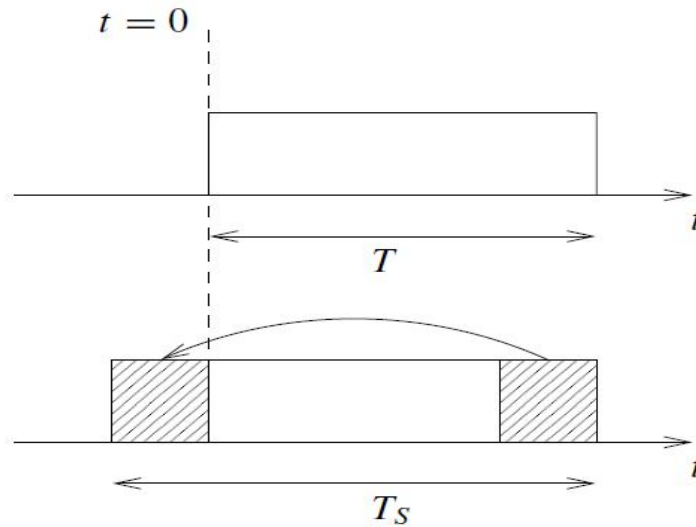


Figura 1.5: Introduciendo un intervalo de guarda.[3]

Relación de Potencia Pico a Promedio de señales OFDM

Del inglés Peak-to-Average Power Ratio – PAPR, es un inconveniente que se ha visto muy presente en la modulación OFDM. En sistemas RF, el principal problema reside en que la ganancia del amplificador en el extremo del transmisor se satura a una potencia de entrada alta generando así la potencia pico. Una forma de evitar esto es operar el amplificador de potencia en el llamado régimen de "back off" pesado, donde la potencia de la señal es mucho menor que la potencia de saturación del amplificador. Desafortunadamente, esto requiere un exceso de potencia de saturación grande para el amplificador de potencia, lo que inevitablemente conduce a una baja eficiencia de potencia [2].

Una alta PAPR de una señal OFDM se puede entender fácilmente a partir de su naturaleza multiportadora. Debido a que el prefijo cíclico es una copia avanzada de una parte

de la señal OFDM en el período de observación, nos centramos en la forma de onda dentro del período de observación. La forma de onda del dominio de tiempo transmitido para un símbolo OFDM se puede escribir como:

$$s(t) = \sum_{k=0}^{N_{sc}} C_k e^{j2\pi f_k t}, f_k = \frac{k-1}{T_s} \quad (1.9)$$

La PAPR de una señal OFDM está definida como

$$PAPR = \frac{\max[|s(t)|^2]}{E[|s(t)|^2]} \quad (1.10)$$

Para simplificar, asumimos que se utiliza una codificación M-PSK, donde $|C_k|=1$. El máximo teórico de PAPR es $10\log_{10}(N_{sc})$ en dB, al establecer $C_k=1$ y $t=0$ en la ecuación (1.9). Para sistemas OFDM con 256 subportadoras, el PAPR máximo teórico es de 24 dB, lo que obviamente es excesivamente alto. Afortunadamente, un PAPR tan alto es un evento raro, por lo que no debemos preocuparnos por ello. Una mejor manera de caracterizar el PAPR es usar la función de distribución acumulativa complementaria del ingles Complementary Cumulative Distribution Function (CCDF) de PAPR, P_c , que se expresa como

$$P_c = Pr[PAPR > A] \quad (1.11)$$

Siendo, P_c es la probabilidad de que PAPR exceda un valor particular de A.

La Figura muestra la CCDF con un número variable de subportadoras. Se ha asumido la codificación QPSK para cada subportadora.

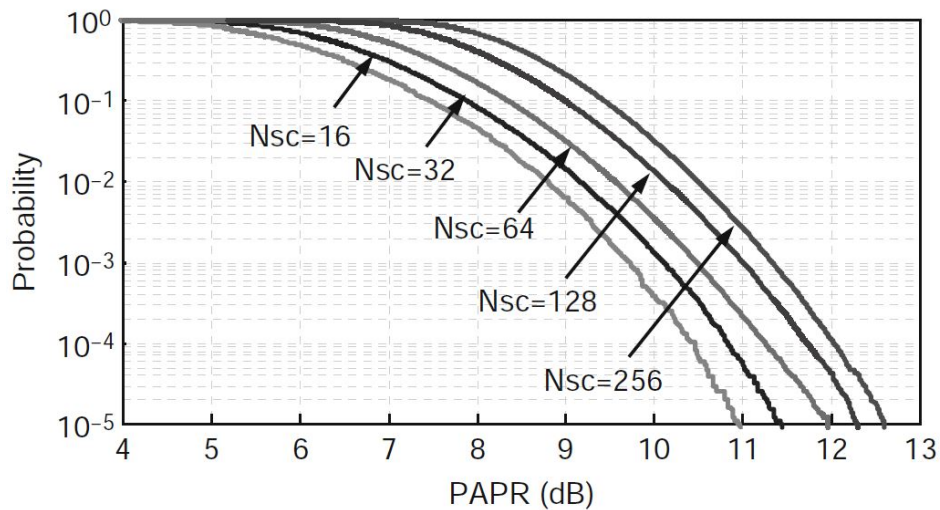


Figura 1.6: Función de distribución acumulativa complementaria, P_c , para el PAPR de señales OFDM con números variables de subportadoras [2].

Se puede ver que a pesar de la PAPR máxima teórica de 24 dB para los sistemas OFDM de 256 subportadoras, para regímenes de probabilidad, como un CCDF de 10^{-3} , PAPR es aproximadamente 11.3 dB, que es mucho menor que el valor máximo de 24 dB. Un PAPR de 11.3 dB sigue siendo muy alto porque implica que el valor pico es aproximadamente un orden de magnitud más fuerte que el promedio, y se debe usar alguna forma de reducción de PAPR. También es interesante observar que el PAPR de una señal OFDM aumenta ligeramente a medida que aumenta el número de subportadoras. Por ejemplo, PAPR aumenta aproximadamente 1.6 dB cuando el número de subportadoras aumenta de 32 a 256.

La forma de onda muestreada se usa para la evaluación PAPR, y posteriormente los puntos muestreados pueden no incluir el verdadero valor máximo de la señal OFDM. Por lo tanto, es esencial sobredimensionar la señal OFDM para obtener un PAPR preciso. Supongamos que el factor de sobremuestreo es h ; es decir, el número de puntos de muestreo aumenta de N_{sc} a hN_{sc} con cada punto de muestreo dado por

$$t_l = \frac{(l-1)T_s}{hN_{sc}}, l = 1, 2, \dots, hN_{sc} \quad (1.12)$$

Sustituyendo la ecuación (1.12) y la condición de ortogonalidad en la ecuación (1.9), la l th muestra de $s(t)$ se convierte en

$$s_l = s(t_l) = \sum_{k=0}^{N_{sc}} C_k e^{j2\pi \frac{(k-1)(l-1)}{hN_{sc}}}, l = 1, 2, \dots, hN_{sc} \quad (1.13)$$

Ampliando el número de subportadoras c_k de N_{sc} a hN_{sc} agregando ceros al conjunto original, el nuevo símbolo de la subportadora c'_k después del zero padding viene dado formalmente por

$$\begin{aligned} c'_k &= c_k, k = 1, 2, \dots, N_{sc} \\ c'_k &= 0, k = N_{sc} + 1, N_{sc} + 2, \dots, hN_{sc} \end{aligned} \quad (1.14)$$

Usando el nuevo conjunto de subportadoras c'_k , ecuación (1.13) se reescribe como

$$s_l = \sum_{k=0}^{hN_{sc}} C'_k e^{j2\pi \frac{(k-1)(l-1)}{hN_{sc}}} = F'(c'_k), l = 1, 2, \dots, hN_{sc} \quad (1.15)$$

De la ecuación (1.15), se deduce que el sobremuestreo de h veces puede ser logrado por IFFT de un nuevo conjunto de subportadoras que rellena a cero el conjunto de subportadoras original a h veces el tamaño original.

La Figura muestra el CCDF de PAPR variando los factores de sobremuestreo de 1 a 8. Se puede ver que la diferencia entre el muestreo de Nyquist ($h = 1$) y el 8 sobremuestreo excesivo es de aproximadamente 0.4 dB a la probabilidad de 10^{-3} . Sin embargo, la mayoría de la diferencia tiene lugar por debajo del factor de sobremuestreo

de 4, y más allá de esto, la PAPR cambia muy poco. Por lo tanto, parece ser suficiente usar un factor de sobremuestreo de 4 para la investigación de PAPR [2].

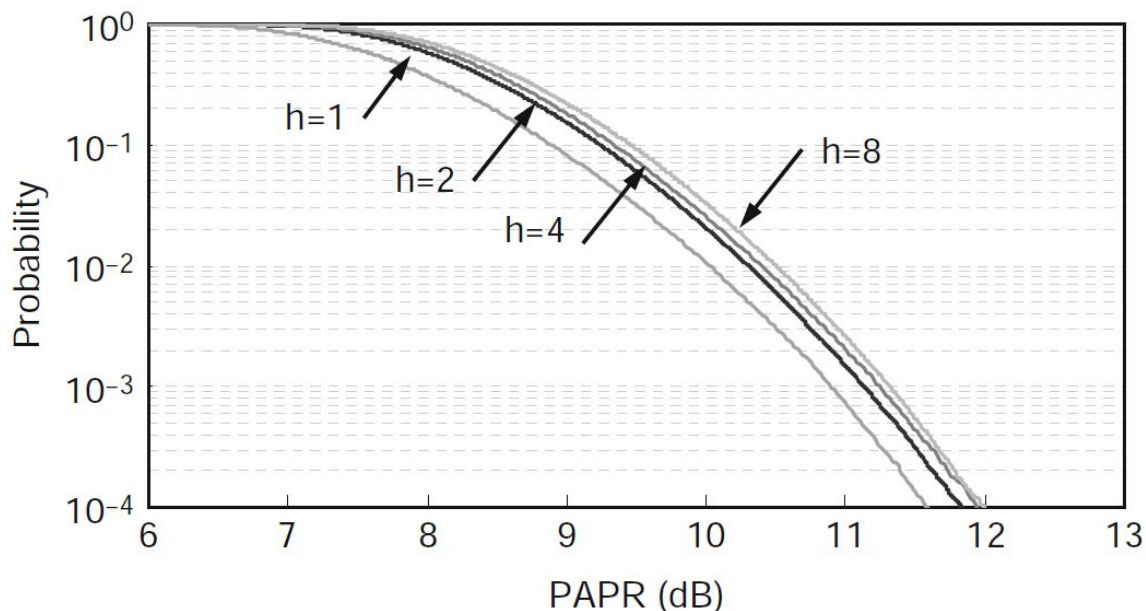


Figura 1.7: Función de distribución acumulativa complementaria para el PAPR de una señal OFDM con diversos factores de sobremuestreo. [2]

Es obvio que el PAPR de una señal OFDM es excesivamente alto para los sistemas RF y ópticos. En consecuencia, la reducción de PAPR ha sido un campo intensamente perseguido. Teóricamente, para la codificación QPSK, se puede obtener un PAPR menor a 6 dB con solo un 4 por ciento de redundancia. Desafortunadamente, tal código no ha sido identificado hasta ahora. Los algoritmos de reducción de PAPR propuestos hasta ahora permiten compensaciones entre tres figuras de méritos de la señal OFDM: PAPR, eficiencia de ancho de banda y complejidad computacional.

Los siguientes son los enfoques de reducción de PAPR más populares:

Reducción de PAPR con distorsión de la señal: esto se hace simplemente recortando la señal OFDM. La consecuencia del recorte es el aumento de la tasa de errores de bits (BER) y la distorsión fuera de banda. La distorsión fuera de banda se puede mitigar mediante el filtrado repetido [2].

Reducción de PAPR sin distorsión de la señal: la idea detrás de este enfoque es mapear la forma de onda original a un nuevo conjunto de formas de onda que tienen un PAPR más bajo que el valor deseable, la mayoría de las veces con una reducción de ancho de banda. Los algoritmos de reducción de PAPR sin distorsión incluyen mapeo

de selección, enfoques de optimización tales como secuencia de transmisión parcial y constelación de señal modificada o extensión de constelación activa [2].

1.2. Redes de Fibra Óptica

En esta sección se van a abordar múltiples sub-temas sobre las redes de fibra óptica, para así brindar bases teóricas que permitan una mejor comprensión del trabajo de grado a desarrollar.

1.2.1. Beneficios de las redes ópticas vs las redes eléctricas convencionales

Las redes eléctricas convencionales, hasta hace muy poco, hacían el transporte de señales de información, en redes de telecomunicaciones, mediante cables fabricados principalmente con cobre. Las técnicas de acceso que se brindaban con este tipo de medio(ADSL, HFC, etc.) son limitadas en cuanto velocidad de transmisión y cobertura para el servicio final, por lo que los servicios proporcionados a los clientes no podían ir más allá de los segmentos residenciales y pequeñas empresas.

Con la llegada de la fibra óptica, esto cambio notablemente, pues ésta en comparación a los cables de cobre, tiene muchas ventajas como un mayor ancho de banda por lo tanto una necesidad menor del número de cables para proporcionar una mayor velocidad de transmisión, menor atenuación por lo tanto mayor distancia de cobertura, e impermeabilidad frente a las interferencias electromagnéticas. Por otro lado, gracias a todo lo anterior, los costos asociados al equipamiento y mantenimiento de red se vieron reducidos. [20]

1.2.2. Topologías de redes ópticas

Existen dos topologías distintas de redes ópticas, las redes punto a multi-punto (PtM - Point to Multipoint) y las redes punto a punto(PtP - Point to Point).

En las redes PtM, cada uno de los cables de fibra que nacen en las centrales y salen al exterior, dan servicio a múltiples abonados a través de la incorporación de divisores ópticos. Esta topología es adecuada para aquellos escenarios en los que existen múltiples usuarios con necesidades de ancho de banda moderado, como por ejemplo, servicios ofrecidos a hogares y pequeñas empresas. En este tipo de redes, la información que viaja a través del cable desde la central, llega a todos los usuarios conectados a la misma fibra. Para que cada usuario reciba exclusivamente los contenidos que le pertenecen, se acude a diferentes técnicas de multiplexado de tramas de datos.[21]

Las redes PtP ofrecen mayor ancho de banda, ya que cada abonado dispone de una fibra propia y dedicada que lo conecta con la central. Las distribuciones PtP son recomendaciones para empresas de mediano y gran tamaño con importantes necesidades de

ancho de banda garantizado.

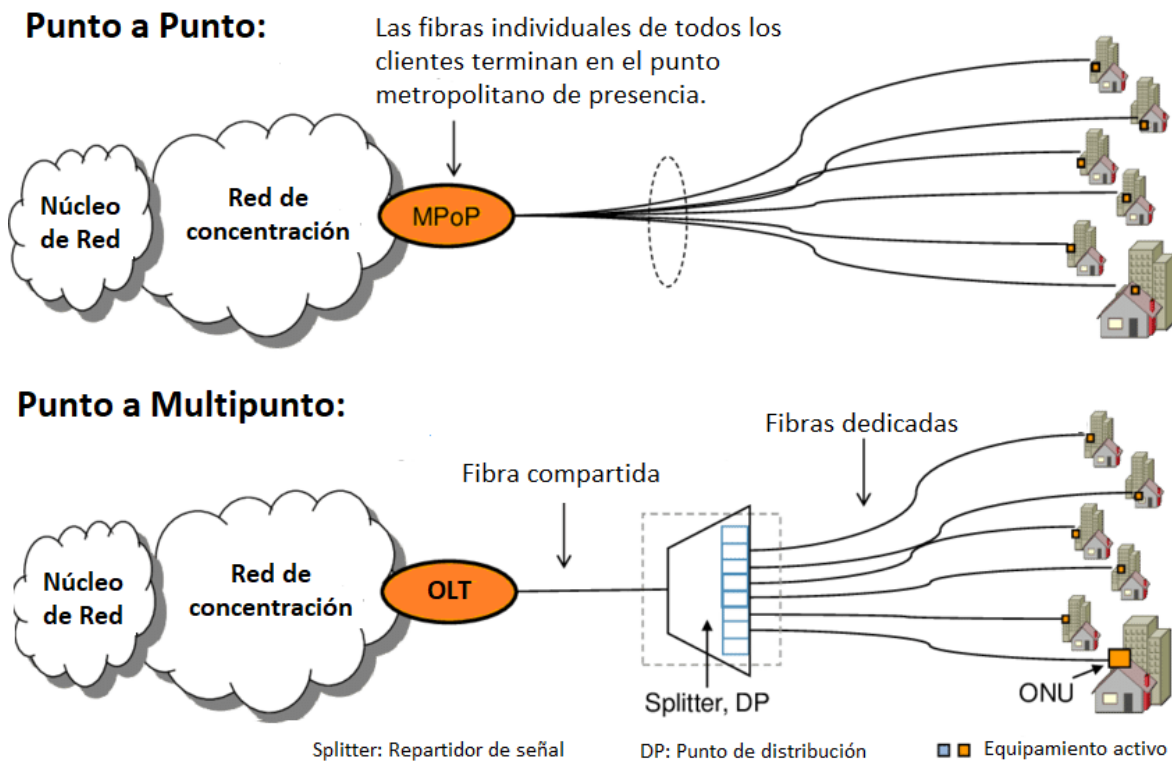


Figura 1.8: Topologías PtP y PtM de capa física PON.[4]

En la figura 1.8 se han representando ambos tipos de topologías de red sobre una distribución PON, PtP en la parte superior y PtM en la parte inferior.

1.2.3. Mecanismos de reparto de la señal de información óptica

En el contexto de la arquitectura de redes de fibra óptica compartida, existen dos mecanismos distintos de reparto de señal hacia los suscriptores, las redes ópticas activas y pasivas.

Las redes ópticas activas (AON - Active Optical Network), utilizan equipos con alimentación eléctrica para la distribución de señales hacia los usuarios. Las 12 redes AON pueden utilizar fibras ópticas de tipo mono-modo y multi-modo, donde las señales requieren normalmente una transformación eléctrica-óptica. Se tratan de redes basadas en el Standard IEEE 802.ah, y proveen un ancho de banda simétrico con velocidades superiores a 1Gb/s por cada puerto sobre una única fibra. Para la transmisión, utilizan normalmente dos longitudes de onda multiplexadas sobre cada fibra óptica. De esta manera, por cada fibra conviven dos canales de transmisión a distinta longitud de onda, uno para el canal de transmisión y el otro para el canal de recepción. Esto permite una comunicación de datos Full-Dúplex mediante una conexión punto a punto con un

ancho de banda dedicado al usuario.

Por otro lado, una red óptica pasiva (PON - Passive Optical Network) no cuenta con equipos que precisen de alimentación eléctrica. Estas redes permiten eliminar todos los componentes activos en la arquitectura de red que si están presente en su competidora AON. El elemento principal será el splitter o divisor óptico de potencia, el cual separará y recolectará las señales ópticas que se propaguen a través de la red, sin necesidad de ningún aporte de alimentación externa. Las redes PON también pueden ser implementadas mediante el despliegue de fibras ópticas mono-modo y multi-modo.[20]

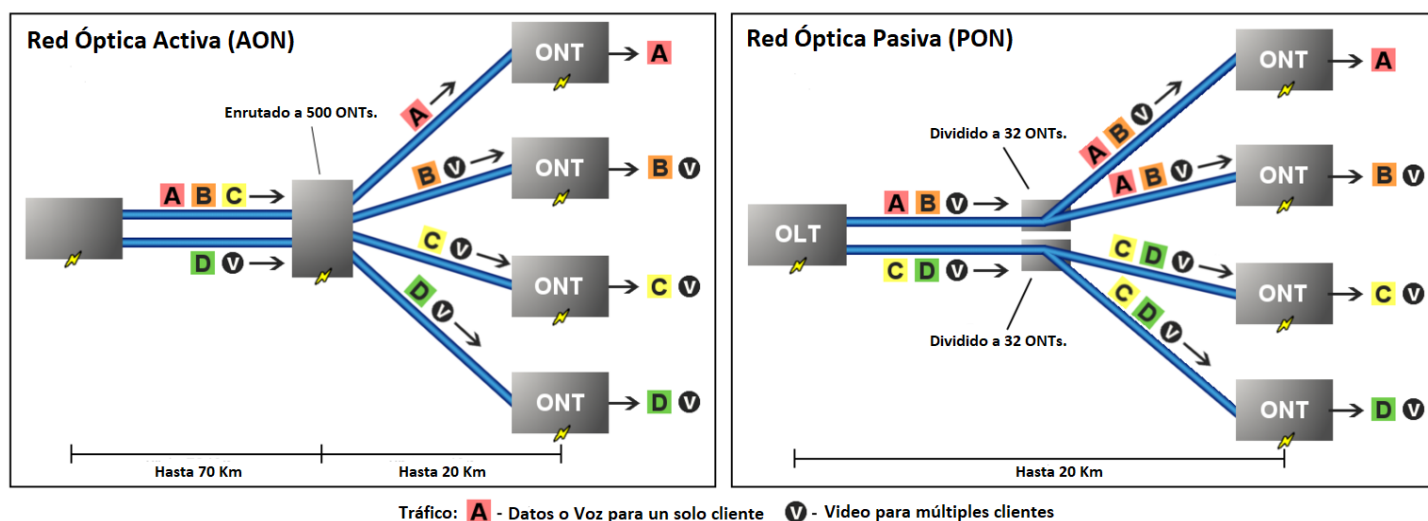


Figura 1.9: Mecanismos de reparto AON Y PON.[5]

Puede notarse en la figura 1.9, como el enrutador activo de la red AON es capaz de direccionar un mayor número de señales ópticas (normalmente entre 400 y 500, pudiendo llegar hasta 1000) que una red PON (el número varía considerablemente dependiendo del estándar en el que esté basado la red). Sin embargo, los medios necesarios para conseguir esta aparente mejora traen consigo algunas implicaciones negativas. En AON, cada señal descendente está dirigida solo al cliente destinatario, es decir, se trata de una conexión punto a punto en la que cada fibra es dedicada a un único usuario. En cambio, las redes PON siguen una comunicación punto a multi-punto mediante broadcast descendente, donde el mensaje es enviado a múltiples destinatarios que comparten la misma fibra óptica. De ello se deriva que el planteamiento PtM empleado en redes PON respecto al PtP en redes AON, reduce drásticamente tanto el número de cables de fibra óptica que nacen desde la central, como el equipamiento requerido asociado.

La utilización de sistemas pasivos trae consigo una diversa cantidad de mejoras notables respecto del planteamiento activo:

- Reducción de la inversión inicial en el despliegue (CAPEX - capital expenditures), debido a que la planta externa PON no precisa de instalación de componentes

electrónicos.

- Optimización de los costes de operación (OPEX - operating expenditures), ya que se simplifican las tareas de mantenimiento y monitorización de componentes, además de reducir el consumo de energía.
- Mayor fiabilidad del sistema, debido a la inexistencia de componentes electrónicos que por naturaleza tienden al fallo.

Por consiguiente, la planta externa en sistemas ópticos para la provisión de servicios, constituida por el conjunto de medios que enlazan la central telefónica con los clientes, puede basarse tanto en mecanismos AON como PON. De entre ambas opciones, las redes PON son la clase más importante en la actualidad dadas sus notables ventajas.[20]

1.2.4. Estructura y funcionamiento de una red PON

Las redes ópticas pasivas se emplean para transmitir de forma simultánea señales tanto en dirección ascendente como descendente desde y hasta los puntos finales de usuario. Los bloques realmente “pasivos” de las redes PON, son los splitters y la fibra óptica como tal, dado que no requieren suministro eléctrico. Los splitters ópticos no seleccionan longitudes de onda, sino que simplemente dividen las longitudes de onda de la gama óptica en dirección descendente. Evidentemente, la división de una señal óptica implica una pérdida de potencia que depende del número de vías en las que se divide una señal. Los splitters no requieren refrigeración alguna ni ningún otro mantenimiento continuo propio de los componentes de las redes activas (como los amplificadores ópticos) y pueden durar durante décadas si permanecen intactos. Además de los componentes pasivos, se requieren dispositivos finales activos para crear una red PON al completo.[22]

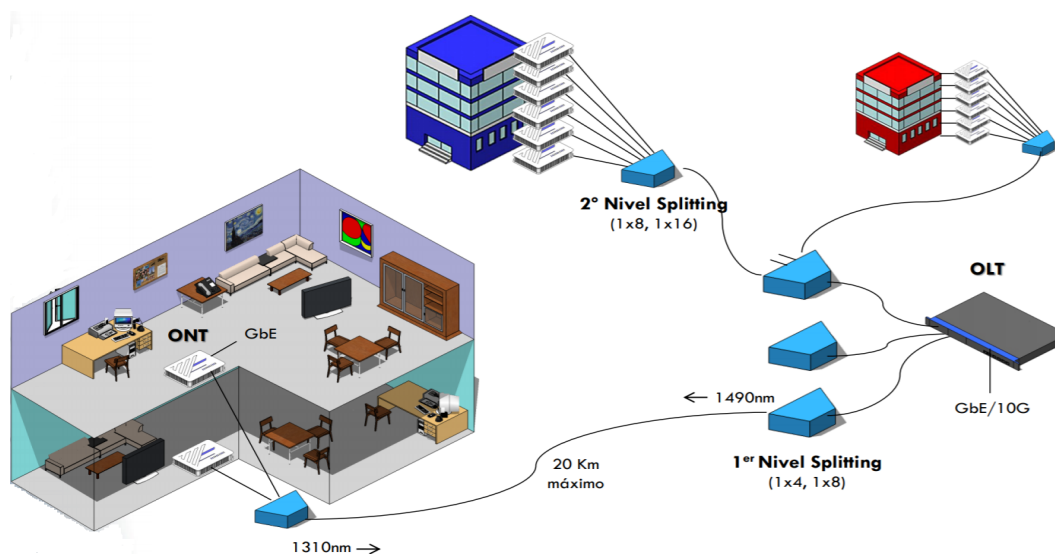


Figura 1.10: Topología estándar PON.[6]

Como se puede apreciar en la figura 1.10, el terminal de línea óptica (OLT) es el punto de partida de la red óptica pasiva. Se conecta a un núcleo de conmutación a través de dispositivos enchufables Ethernet. Su función principal es convertir, entramar y transmitir señales para la red PON y coordinar la multiplexación del terminal de red óptica (ONT) para la transmisión ascendente compartida. Es posible que también se haga referencia a los dispositivos de usuario final como unidad de red óptica (ONU). Esto responde simplemente a una diferencia terminológica entre los dos principales organismos normalizadores: el ITU-T, que emplea el término ONT, y el IEEE, que usa el término ONU. Así pues, ambos términos son intercambiables, pero el uso de uno u otro dependerá del servicio de la red PON y de la norma que se utilice.

Por otro lado, el ONT es el dispositivo eléctrico del sistema de red óptica pasiva en el lado opuesto (el del usuario) de la red e incluye puertos Ethernet para conectividad de red o dispositivos domésticos.[22]

1.2.5. Canal ascendente y descendente en una red PON

El canal descendente en un sistema PON tradicional consiste en un esquema PtM en el que la OLT envía una serie de contenidos hacia el divisor óptico, el cual se encargará de distribuir estos contenidos hacia todas las ONUs sin llevar a cabo ningún tipo de discriminación. Las ONUs se encargarán de filtrar los mensajes para distribuir los distintos contenidos exclusivamente hacia sus destinatarios, tal y como puede visualizarse en la figura 1.11. Este procedimiento utiliza multiplexación por división de tiempo (TDM - Time Division Multiplexing) para enviar la información en diferentes instantes de tiempo, y de esa forma poder transmitir multitud de mensajes pertenecientes a diferentes transmisores/receptores a través de la misma fibra óptica.[20]

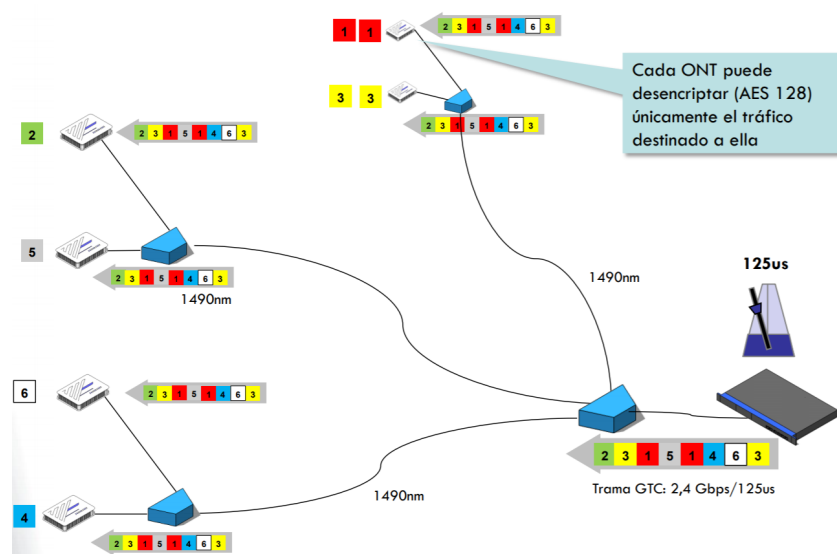


Figura 1.11: Canal Descendente PON.[6]

Sin embargo, el canal ascendente en una red PON presenta una arquitectura punto a punto en la cual las diferentes ONUs implicadas transmiten su información particular hacia la OLT. De la misma forma que en el canal descendente, se empleará TDMA (Time Division Multiple Access) para la multiplexación de datos, donde cada ONU enviará fragmentos de información en diferentes instantes de tiempo de manera controlada y sincronizada por la OLT, tal y como se aprecia en la figura 1.12.

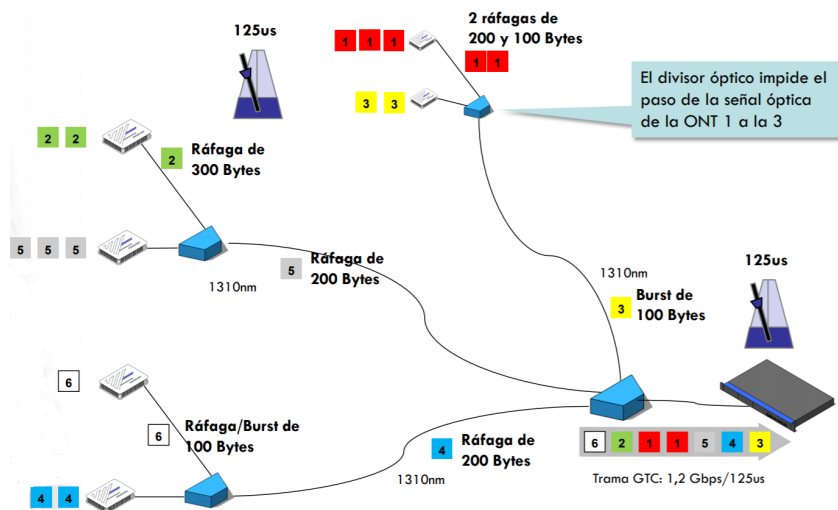


Figura 1.12: Canal Ascendente PON.[6]

A fin de evitar interferencias entre las señales de los canales ascendente y descendente, dos longitudes de ondas diferentes conviven en la misma fibra mediante multiplexación por división de longitud de onda (WDM - Wavelength Division Multiplexing), una para cada canal. A su vez, cada canal con su correspondiente longitud de onda asociada, multiplexará datos de distintos usuarios mediante TDM tal y como se comentó previamente.

Las redes PON tienen en consideración los efectos producidos en las señales por la distancia existente entre los usuarios y las centrales de telecomunicación. Estos sistemas controlan y regulan la potencia de transmisión de las señales, para asegurar que una vez que sean propagadas por la red de fibra óptica y hayan sufrido el nivel de atenuación correspondiente, llegue al receptor con un nivel de potencia igual o superior a su sensibilidad.[20]

1.3. Arquitecturas ópticas de nueva generación

Propuestas por el grupo de tareas FSAN (Full Service Access Network), con el objetivo de satisfacer las necesidades actuales, y, sobre todo a futuro, de los operadores de telecomunicaciones, en cuanto al desarrollo de especificaciones para sistemas de acceso óptico, más allá de los actualmente estandarizados.

1.3.1. Grupo FSAN

El grupo de Red de Acceso de Servicio Completo(FSAN), es un foro para los proveedores de servicios de telecomunicaciones, laboratorios de pruebas independientes y proveedores de equipos líderes en el mundo para trabajar hacia un objetivo común de unas redes de acceso de fibra verdaderamente de banda ancha. FSAN tiene más de 70 organizaciones miembros, incluidos más de 20 operadores de red, que representan a los principales expertos en tecnologías BPON, GPON, XG-PON, XGS-PON y NG-PON2.

La misión de FSAN es impulsar los estándares existentes en los servicios y productos de la industria al mismo tiempo que se introducen sus propias especificaciones en los organismos de estandarización apropiados. Se tiene mucho cuidado para asegurar que haya un mínimo de superposición o duplicación de esfuerzos con otras organizaciones como BBF. FSAN no es una Organización de Desarrollo de Estándares(SDO) como tal, y no se relaciona con las SDO, tampoco acepta ni establece vínculos. Las empresas miembros de FSAN aportan contribuciones técnicas relacionadas con temas de estudio actuales a las reuniones de FSAN y actúan como redactores de documentos del mismo. Típicamente, las compañías miembros de FSAN ofrecerán contribuciones al grupo de estudio 15, asunto 2 de la UIT-T, basado en los elementos de trabajo completados de FSAN que tienen por objeto promover el desarrollo de estándares PON globales.[23]

El Grupo de Trabajo único de FSAN se denomina Red de Acceso Óptico (OAN). Dentro de la OAN se encuentran los siguientes grupos de trabajo activos:

- **Grupo de tareas de Operación e Ingeniería:**

Tiene el objetivo de permitir una interoperabilidad total de los sistemas PON basados en las especificaciones de la FSAN/UIT-T en un escenario de múltiples proveedores.

- **Grupo de trabajo de la Red Óptica Pasiva de Nueva Generación (NG-PON):**

Tiene como objetivo capturar los requisitos de los operadores y desarrollar especificaciones para los sistemas de acceso óptico más allá de los actualmente estandarizados.

Otros Grupos de Trabajo y temas de estudio en la FSAN pueden ser iniciados según lo requieran los participantes de la FSAN.[23]

Plan de trabajo de FSAN

Una herramienta clave para guiar el trabajo de FSAN y de la industria en general es un plan de trabajo sobre estándares. Con la publicación de los estándares XGS-PON y NG-PON2 por la UIT-T, FSAN ha cumplido con su plan de trabajo anterior. En noviembre de 2016, FSAN publicó un nuevo mapa de ruta de estándares, figura 1.13, para ayudar a guiar a la industria en general y servir de estímulo para la estandarización y el desarrollo tecnológico en el futuro.[7]

FSAN Standards Roadmap 2.0

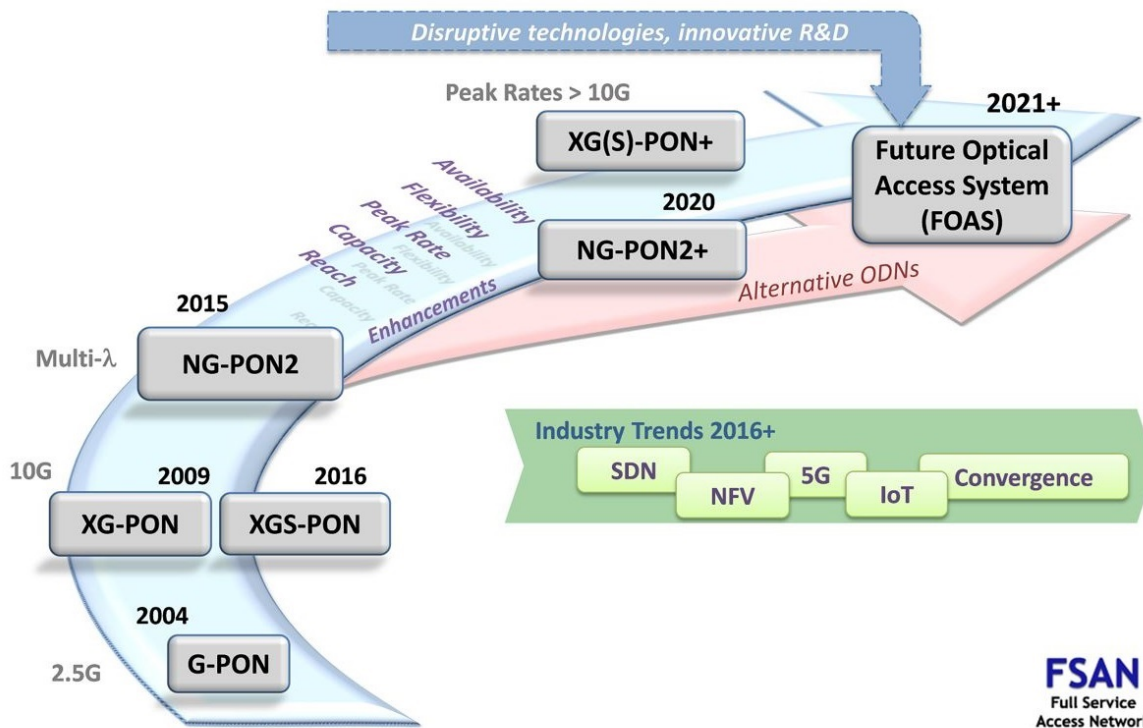


Figura 1.13: Mapa de ruta de estándares, 2.0, FSAN (publicado en noviembre de 2016).[7]

1.3.2. Estándares PON

De entre las distintas recomendaciones definidas a lo largo del tiempo para la implementación de redes PON que a día de hoy se consideran estándares, podrían citarse A-PON, B-PON, G-PON, E-PON y 10G-EPON, de los cuales G-PON es el más extendido actualmente. A continuación, se presentarán los datos más representativos de cada uno de estos estándares:

A-PON(ATM PON)

Se trata del primer sistema de banda ancha definido por el grupo FSAN. Su transmisión en canal descendente está basado en un tráfico de ráfagas de celdas ATM (Asynchronous Transfer Mode). A-PON tuvo gran éxito inicial en cuanto a despliegue comercial, pero carecía de la capacidad necesaria para ofrecer servicios de vídeo. El estándar ofrecía inicialmente una velocidad máxima de transmisión de 155 Mbps repartida entre todas las ONUs conectadas, pero posteriormente fue aumentada hasta los 622 Mbps [20].

B-PON(Broadband PON)

Principalmente está basado en A-PON, pero adicionalmente incluye la capacidad de dar soporte a otros servicios. Esto incluye una amplia gama de servicios de banda ancha y va más allá del acceso ATM. Por esta razón, B-PON sustituye al uso anterior de A-PON. [24].

G-PON(Gigabit capable PON)

Las redes PON con capacidad Gigabit, o G-PON, desarrolladas por el ITU-T utilizan protocolos basados en IP y son conocidas por su extraordinaria flexibilidad con respecto a los tipos de tráfico, incluidas las aplicaciones Triple-Play para voz, Internet y televisión. El método de encapsulación de redes G-PON genérico es capaz de empaquetar tipos de datos IP, Ethernet y VoIP, entre muchos otros.

La red G-PON se considera hoy en día el estándar de facto de red PON, con redes que abarcan distancias de entre 20 y 40 km, en función de la relación de segmentación que se adopte, con fibra mono-modo. La longitud de onda descendente se establece en 1490 nm con una longitud de onda ascendente de 1310 nm, con una velocidad de bajada de 2,4 Gbps y una velocidad de subida de 1,2 Gbps.[22]

E-PON(Ethernet PON)

Otro estándar de redes ópticas pasivas del IEEE es la red PON Ethernet, o E-PON, que se ha desarrollado para ofrecer una compatibilidad sin fisuras con los dispositivos Ethernet. Las redes E-PON, que se basan en el estándar IEEE 802.3, no requieren encapsulación adicional alguna ni protocolos de conversión para conectarse a las redes basadas en Ethernet. Esto es aplicable tanto a la dirección de transferencia de datos ascendente como a la descendente.

Las redes E-PON convencionales pueden admitir velocidades simétricas de hasta 1,25 Gbps de subida y bajada. De forma muy similar a las redes G-PON, las redes E-PON proporcionan una cobertura de entre 20 y 40 km, también en función de la relación de segmentación, y emplean longitudes de onda similares (ascendente de 1310 nm y descendente de 1490 nm), por lo que estas redes E-PON y G-PON no pueden implementarse en la misma red PON.[22]

10G-EPON

El estándar 10G-E-PON más avanzado incrementa las velocidades a unos valores ascendente y descendente simétricos de 10 Gbps. Además, funciona a diferentes longitudes de onda con respecto a las redes E-PON, con una longitud de onda descendente de 1577 nm y una longitud de onda ascendente de 1270 nm. Esto permite que se utilice la misma red PON tanto para redes E-PON como para redes 10G-E-PON a la vez a

modo de mecanismo para permitir una óptima actualización del servicio e incrementos de capacidad en la red PON existente.[22]

1.3.3. Estándares NG-PON

G-PON se implantó frente a su principal competidor E-PON debido principalmente a que este ofrecía mayores funcionalidades estándar para gestión de la calidad, mayores garantías de evolución segura, además de que en los últimos años se ha convertido en una opción muy competitiva en cuanto a costes se refiere.

A pesar de los amplios beneficios de G-PON, la aparición de nuevos servicios con mayores requerimientos de ancho de banda, impulsó la creación del grupo NG-PON (Next Generation Passive Optical Network) propuesta por el grupo de tareas FSAN (Full Service Access Network), con la idea de satisfacer las necesidades actuales, y, sobre todo a futuro, de los operadores de telecomunicaciones, en cuanto al desarrollo de especificaciones para sistemas de acceso óptico, más allá de los actualmente estandarizados. El objetivo de NG-PON era el de desarrollar nuevas generaciones de redes PON que permitieran un acceso con ancho de banda prácticamente ilimitado, dividiendo el proyecto en dos fases diferenciadas, NG-PON1 y NG-PON2. La primera fase empezó con el estándar XG-PON1 (XG-PON) y culminó con el estándar XG-PON2 (XGS-PON), mientras que la segunda se encuentra en etapa de maduración. Una de las premisas establecidas por NG-PON, fue la de reutilizar tanto como fuese posible la red óptica pasiva instalada desde la central hasta los abonados, ya que su coste supone alrededor del 75-85 % de la inversión global de los sistemas de banda ancha basados en comunicaciones ópticas [20].

La creación del nuevo estándar NG-PON1 permitió un aprovechamiento más eficiente de la red, como por ejemplo el de maximizar la velocidad de transmisión de la red móvil 4G. XG-PON permitió soportar 10 Gbps de bajada y 2,5 Gbps de subida, o una segunda opción de 10 Gbps simétricos con el estándar XGS-PON, lo cual supuso un considerable aumento del ancho de banda. Además de sus elevadas prestaciones, otro de los motivos que fomentó el éxito de la implantación de XG-PON fue la compatibilidad aportada con su antecesor G-PON, habilitando la coexistencia entre ambos estándares sobre la misma infraestructura FTTH, lo cual supuso importantes ahorros de obra civil, instalación y mantenimiento [20].

Arquitecturas ópticas de nueva generación

La Figura 1.14 muestra algunas de las arquitecturas posibles más relevantes en función del punto alcanzado por el tramo de fibra óptica, pudiendo distinguir entre fibra hasta el hogar (FTTH - Fiber to the Home), fibra hasta el edificio (FTTB - Fiber to the Building), fibra hasta la esquina (FTTC - Fiber to the Curb), y fibra hasta el gabinete de telecomunicaciones (FTTCab - Fiber to the Cabinet) conformando estos lo que es la red de distribución óptica.

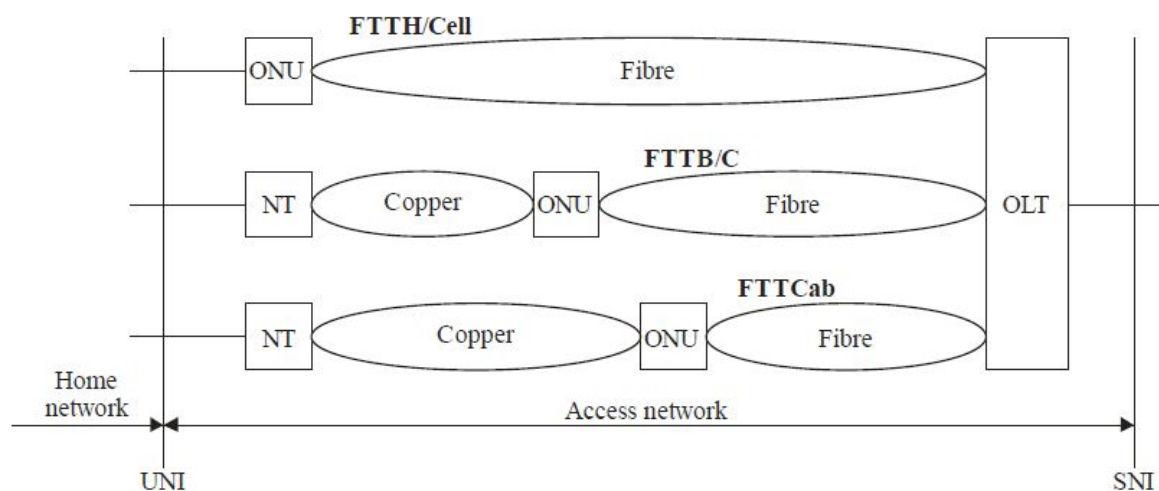


Figura 1.14: Arquitectura de Red.[8]

La red de distribución óptica (ODN - Optical Distribution Network) en el contexto de sistemas PON, consiste en un árbol de fibras ópticas en la red de acceso, complementado con divisores de potencia o divisores de longitud de onda, filtros u otros dispositivos ópticos pasivos [8]. A diferencia de las redes troncales y/o de agregación, las ODNs de acceso implementan una arquitectura de fibra única por la que circulan todas las señales [20].

La unidad de red óptica (ONU - Optical Network Unit), es un término genérico empleado para referirse al dispositivo que delimita la red óptica, en cualquiera de los puntos finales de la ODN. En algunos contextos, una ONU implica un dispositivo para múltiples suscriptores [8].

La terminación de línea óptica (OLT - Optical Line Termination), es un dispositivo situado en la terminación de la ODN, concretamente en la centralita. Consiste en un elemento activo del que parten las comunicaciones ópticas en el enlace, agregando tráfico y encaminándolo hacia múltiples usuarios destinatarios. Adicionalmente, la OLT proporciona funciones de gestión y mantenimiento a la ODN y ONUs a las que sustenta [8].

La terminación de red óptica (ONT - Optical Network Termination), es un dispositivo único para cada abonado [8], que representa a la ONU en el caso particular de la arquitectura FTTH, en la cual el dispositivo se encuentra alojado en la vivienda del cliente. La ONU hace de interfaz entre la red de fibra óptica y el usuario final, mediante la conversión de señales ópticas a eléctricas. También brinda otras funciones adicionales como módulos multiplexores y demultiplexores [20].

La terminación de red (NT - Network Termination) se emplea para identificar el punto final de la planta externa en el lado del domicilio del cliente, coincidiendo con la ONT

en la arquitectura FTTH [20].

La interfaz de red de usuario (UNI - User Network Interface), es el punto físico que representa la delimitación entre el dominio del cliente y el dominio del proveedor del servicio, mientras que SNI (Service Node Interface) probé una forma de acceso a las funciones del nodo de servicio (service node fuction) [20].

La red de acceso óptico (OAN - Optical Access Network) es común a todas las arquitecturas presentadas en la Figura dando lugar a un sistema global resultante que puede transmitir grandes volúmenes de datos como resultado de la contribución de cada una de las arquitecturas individuales [8].

En la Figura 1.15, se muestra la configuración de referencia tanto para XG-PON y XGS-PON a alto nivel.

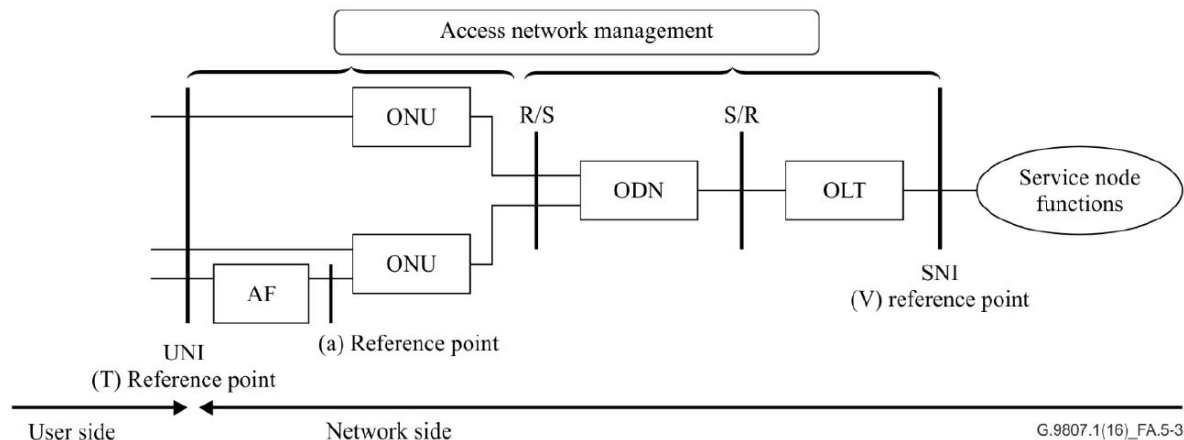


Figura 1.15: Arquitectura de Referencia de Alto Nivel para XG-PON/XGS-PON[8]

Los elementos AF (Adaptation Function), realizan funciones de adaptación que en ciertas ocasiones podrían estar incluidas en las propias ONUs.

En cuanto a los puntos de referencia R/S:

S. Representa al punto de la red situado justo después de la OLT en sentido descendente, y después de la ONU en sentido ascendente.

R. Representa al punto de la red (conector o empalme óptico) situado justo antes de la conexión ONU en sentido descendente, y antes de la OLT en sentido ascendente.

Por otro lado, la Figura 1.16 presenta la arquitectura de referencia de la red de acceso óptico (OAN) aplicada a XG-PON y XGS-PON, aportando en esta ocasión un mayor nivel de detalle. Se aprecia como la ODN, puede consistir en un único segmento de distribución óptico pasivo (ODS - Optical Distribution Segment), o bien puede estar formada por un grupo de ODSs pasivos interconectados entre si mediante extensores de alcance (RE - Reach Extenders).

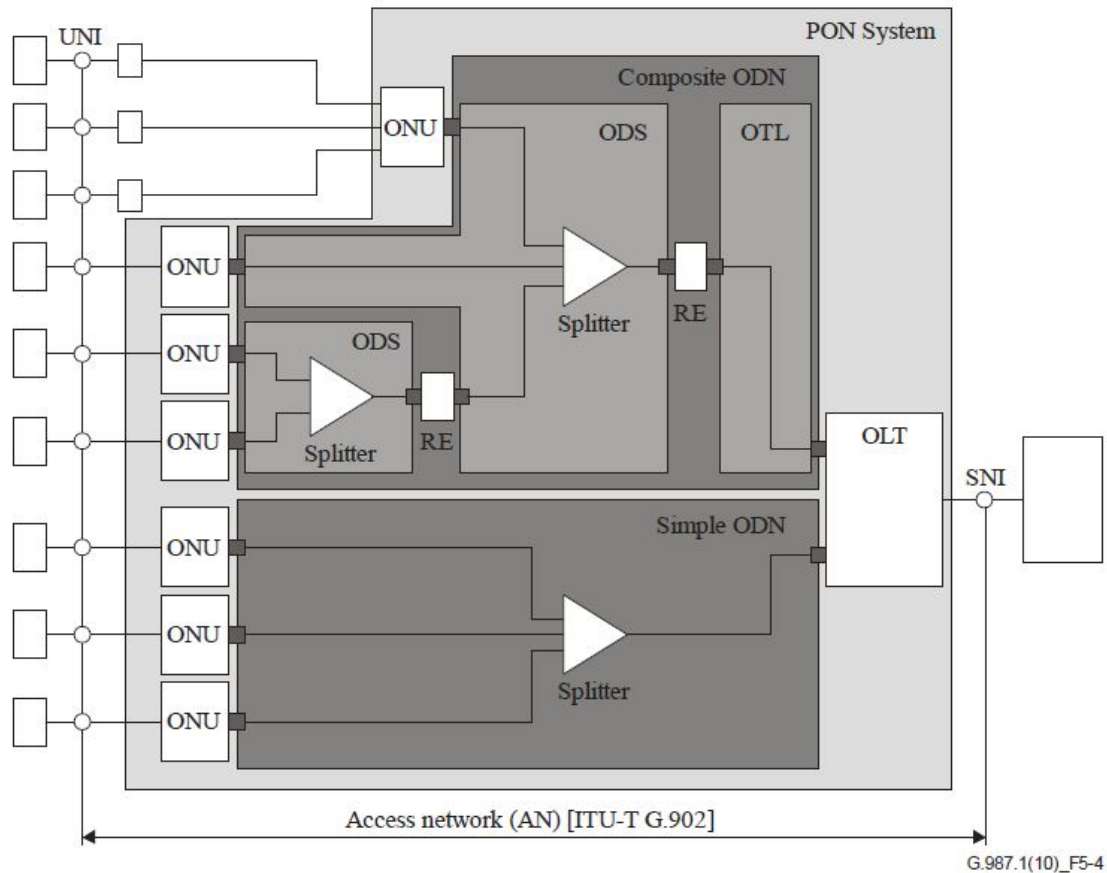


Figura 1.16: Arquitectura de Referencia de la Red Acceso para XG-PON/XGS-PON[9]

Características de las redes ópticas de nueva generación

XG-PON ha definido dos opciones distintas de velocidad de transmisión, las cuales se ilustran sobre la Tabla 1.1.

	DESCENDENTE	ASCENDENTE
XG-PON1	10 Gbps	2.5 Gbps
XG-PON2	10 Gbps	10 Gbps

Tabla 1.1: Tasas de transmisión de XG-PON[8]

En la Tabla 1.2, se muestran las longitudes de onda de operación definidas para el sistema XG-PON1 sobre un esquema de fibra única.

XG-PON1 ASCENDENTE	
Limite Inferior	1260 nm
Limite Superior	1280 nm
XG-PON1 DESCENDENTE	
Limite Inferior	1575 nm
Limite Superior	1580 nm

Tabla 1.2: Longitudes de Onda XG-PON1[8]

En la Tabla 1.3, se muestran los parámetros de potencia de transmisión y sensibilidad referidos a XG-PON1 (10 Gbps descendente, 2.5 Gb/s ascendente), tanto para las ONUs como las OLTs.

Elemento	Valor Nominal					
OLT						
Clase ODN	N1	N2		E1	E2	
		N2a	N2b		E2a	E2b
Potencia media de transmisión (MIN)	+2 dBm	+4 dBm	+10.5 dBm	+6 dBm	+8 dBm	+14.5 dBm
Potencia media de transmisión (MAX)	+6 dBm	+8 dBm	+12.5 dBm	+10 dBm	+12 dBm	+10.5 dBm
Sensibilidad Minima	-27.5 dBm	-29.5 dBm		-31.5 dBm	-33.5 dBm	
ONU						
Clase ODN	N1	N2		E1	E2	
		N2a	N2b		E2a	E2b
Potencia media de transmisión (MIN)	+2 dBm	+2 dBm		+2 dBm	+2 dBm	
Potencia media de transmisión (MAX)	+7 dBm	+7 dBm		+7 dBm	+7 dBm	
Sensibilidad Minima	-28 dBm	-28 dBm	-21.5 dBm	-28 dBm	-28 dBm	-21.5 dBm

Tabla 1.3: Niveles de Potencia para XG-PON1[14]

Los niveles de potencia óptica XG-PON1 representados en la Tabla 1.3, dependen de las distintas clases de ODN u OPL (Optical Path Loss): Nominal 1 (N1), Nominal 2 (N2), Extendido 1 (E1) y Extendido 2 (E2). Los distintos valores nominales OPL han sido recopilados en la Tabla 1.4.

	N1	N2	E1	E2
Perdidas Minimas	14 dB	16 dB	18 dB	20 dB
Perdidas Maximas	29 dB	31 dB	33 dB	35 dB

Tabla 1.4: Perdidas de trayecto para XG-PON1[14]

En la Tabla 1.5, se muestran las longitudes de onda de operación definidas para el sistema XG-PON2(XGS-PON), presentado un esquema básico y otro opcional.

Basico			
ASCENDENTE		DESCENDENTE	
Limite Inferior	1260 nm	Limite Inferior	1575 nm
Limite Superior	1280 nm	Limite Superior	1580 nm
Opcional			
ASCENDENTE		DESCENDENTE	
Limite Inferior	1300 nm	Limite Inferior	1480 nm
Limite Superior	1320 nm	Limite Superior	1500 nm

Tabla 1.5: Longitudes de Onda XG-PON2(XGS-PON)[9]

En la Tabla 1.6, se muestran los parámetros de potencia de transmisión y sensibilidad referidos a XG-PON2 (10 Gbps simétricos), tanto para las ONUs como las OLTs.

Elemento	Valor Nominal			
OLT				
Clase ODN	N1	N2	E1	E2
Potencia media de transmisión (MIN)	+2 dBm	+4 dBm	+6 dBm	-
Potencia media de transmisión (MAX)	+5 dBm	+7 dBm	+9 dBm	-
Sensibilidad Minima	-26 dBm	-28 dBm	-30 dBm	-
ONU				
Clase ODN	N1	N2	E1	E2
Potencia media de transmisión (MIN)	+4 dBm	+4 dBm	+4 dBm	-
Potencia media de transmisión (MAX)	+9 dBm	+9 dBm	+9 dBm	-
Sensibilidad Minima	-28 dBm	-28 dBm	-28 dBm	-
E2 Para Futuros Estudios				

Tabla 1.6: Niveles de Potencia para XG-PON2(XGS-PON)[15]

Los niveles de potencia óptica XG-PON2 representados en la Tabla 1.6, dependen de las distintas clases de ODN u OPL (Optical Path Loss): Nominal 1 (N1), Nominal 2 (N2), Extendido 1 (E1) y Extendido 2 (E2) el cual esta en estudio. Los distintos valores nominales OPL han sido recopilados en la Tabla 1.7.

	N1	N2	E1	E2
Perdidas Minimas	14 dB	16 dB	18 dB	20 dB
Perdidas Maximas	29 dB	31 dB	33 dB	35 dB

Tabla 1.7: Perdidas de trayecto para XG-PON2(XGS-PON)[15]

NG-PON2

Un sistema con una capacidad total nominal de 40 Gbit/s en sentido descendente y 10 Gbit/s en sentido ascendente. Un sistema NG PON2 está compuesto por un conjunto de canales TWDM y/o un conjunto de canales PtP WDM.[25]

- TWDM PON: Una red óptica pasiva con multiplexación por división de tiempo y longitud de onda es una solución de multiples longitudes de onda en la que cada longitud de onda se comparte entre múltiples unidades de red óptica (ONUs)

mediante el empleo de multiplexación por división de tiempo y mecanismos de acceso múltiple.[26]

En la Tabla 1.8, se muestran las longitudes de onda de operación definidas para el sistema NG-PON2 para los canales TWDM PON.

ASCENDENTE	
OPCIÓN BANDA ANCHA	
Limite Inferior	1524 nm
Limite Superior	1544 nm
OPCIÓN BANDA REDUCIDA	
Limite Inferior	1528 nm
Limite Superior	1540 nm
OPCIÓN BANDA ESTRECHA	
Limite Inferior	1532 nm
Limite Superior	1540 nm
DESCENDENTE	
Limite Inferior	1596 nm
Limite Superior	1603 nm

Tabla 1.8: Longitudes de Onda NG-PON2 con TWDM PON[16]

- PtP WDM: La multiplexación por división de longitud de onda punto a punto es una solución de longitud de onda múltiple que proporciona una longitud de onda dedicada por ONU tanto en sentido descendente como ascendente. La característica definitoria de un PtP WDM es que cada ONU está servida por una o más longitudes de onda dedicadas.[26]

En la Tabla 1.9, se muestran las longitudes de onda de operación definidas para el sistema NG-PON2 para los canales PtP WDM.

ASCENDENTE/DESCENDENTE	
ESPECTRO EXPANDIDO	
Limite Inferior	1524 nm
Limite Superior	1625 nm
ESPECTRO COMPARTIDO	
Limite Inferior	1603 nm
Limite Superior	1625 nm

Tabla 1.9: Longitudes de Onda NG-PON2 con PtP WDM[16]

Capítulo 2

MARCO METODOLÓGICO

2.1. Herramientas de simulación

En esta sección se describen las herramientas que serán usadas para el desarrollo del trabajo de grado y el por qué la elección de éstas.

2.1.1. MATLAB

MATLAB abreviado de MATrix LABoratory, en español Laboratorio de Matrices, es un sistema de cómputo numérico que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio de alto nivel, lenguaje M. Fue originalmente escrito para proveer acceso fácil al software matricial, desarrollado por los proyectos LINPACK y EISPACK, que juntos representan el estado del arte de software para computación matricial. Hoy en día es usado para aprendizaje automático, procesamiento de señales, procesamiento de imágenes, visión artificial, telecomunicaciones, finanzas computacionales, diseño de control, robótica y muchos otros campos. Está disponible para las plataformas Unix, Windows, Mac OS X y GNU/Linux.[27]

Características principales

- Lenguaje de alto nivel, optimizado para cálculos científicos y de ingeniería.
- Entorno de escritorio optimizado para la exploración iterativa, el diseño y la solución de problemas.
- Gráficas para visualizar datos y herramientas para crear diagramas personalizados.
- Toolboxes complementarias para una amplia variedad de aplicaciones científicas y de ingeniería.
- Herramientas para crear aplicaciones con interfaces de usuario personalizadas.

- Interfaces para C/C++, *Java*[®], .NET, Python, SQL, Hadoop y *Microsoft Excel*[®].

2.1.2. OptSim

OptSim es una herramienta de software para el diseño y simulación de sistemas de comunicación óptica a nivel de propagación de señales. Con técnicas de simulación de última generación, una interfaz gráfica de usuario fácil de usar e instrumentos de medición similares a los de laboratorio, OptSim proporciona una precisión y facilidad de uso inigualables. Permite el trabajo de interfaces con herramientas de terceros como MatLab. El software ha estado disponible comercialmente desde 1998 y es utilizado por ingenieros líderes en organizaciones académicas e industriales de todo el mundo.[28]

Aplicaciones

- Sistemas de comunicación óptica coherentes, como PM-QPSK, PM-BPSK, PM-QAM, OFDM
- Sistema DWDM/CWDM con amplificación óptica, como EDFA, Raman, SOA, OPA
- FTTx/PON, incluyendo BPON, G(E)PON, WDM-PON, PON coherente, PON bidireccional basado en RSOA
- Interconexiones ópticas
- Transmisión de solitones

Modos de simulación

La tabla 2.1 muestra las diferentes técnicas de simulación que maneja la herramienta OptSim.

OptSim			
Dominio del Espectro SPT	Dominio del Tiempo VBS		
Evaluación de OSNR y Espectro Optico	Loss	Linear	Full
	Perdida de la Fibra	Efectos Lineales	Efectos Lineales y no Lineales

Tabla 2.1: Técnicas de simulación de la herramienta OptSim

Técnica de Propagación Espectral (SPT, Spectral Propagation Technique)

Es una simulación en el dominio del espectro, donde las señales ópticas son propagadas como espectros de potencia, teniendo en cuenta pérdidas en componentes y ruido; cada componente posee una función de transferencia que no tiene en cuenta las no linealidades de la fibra.

Técnica de Ancho de Banda Variable (VBS, Variable Bandwidth Simulation)

Es una simulación en el dominio del tiempo sobre un ancho de banda variable proporcionado por el usuario. Las señales son propagadas a través de las redes como muestras en el dominio del tiempo, esta técnica es utilizada para simular efectos lineales y no lineales para las componentes ópticas y eléctricos.

2.2. Monitoreo de Rendimiento Óptico (OPM)

Actualmente la fibra óptica centra su participación en el tramo de transporte y en el núcleo o core de las redes de telecomunicaciones, aunque también cuenta con una poca participación en el tramo de acceso; lo anterior en vista de que la fibra presenta múltiples ventajas frente a otros medios (Sub-sección:??) y podía cubrir los volúmenes de tráfico demandados anteriormente, sin embargo, a medida que la demanda de un mayor ancho de banda y mayores velocidades de datos, debida a la diversidad y la alta calidad de servicios, el aumento de usuarios y dispositivos con opción de conectividad; crea redes cada vez más complejas, se introducen más variables que disminuyen el tiempo medio hasta el fallo y aumentan el tiempo medio de reparación si se produce un fallo; debido a esto, nuevos estándares en redes de telecomunicaciones han enfatizado en la necesidad de una red “inteligente” capaz de gestionar su funcionamiento a medida que los parámetros varían.

Las características altamente deseables de una futura red “inteligente” incluyen una mayor robustez, reconfigurabilidad, flexibilidad y seguridad. Para permitir un funcionamiento robusto e inteligente, la red debe ser capaz de:

1. Medir su estado físico y la calidad de las señales de datos que se propagan.
2. Diagnosticar y reparar automáticamente los fallos
3. Tomar medidas antes de que se produzcan fallos y pérdidas de datos.
4. Asignar recursos, incluyendo la longitud de onda/potencia de la señal, la compensación/igualación sintonizable, la codificación de datos, la determinación del trayecto y el ancho de banda del canal
5. Cambiar las tablas de enrutamiento y redirigir el tráfico en función de las condiciones de la capa física.

6. Detectar riesgos de seguridad accidentales y malintencionados.

Todas estas características deseables requieren la capacidad de medir primero los elementos de la red, las rutas y los datos de manera precisa y repetible. Esta deficiencia en la ciencia de la medición y la metrología de las redes de telecomunicaciones conduce a la construcción excesiva y a la utilización ineficiente de las redes actuales. La capacidad de medir la infraestructura y los recursos de la red en tiempo real se conoce típicamente como monitoreo de la red [10]; es aquí donde entra como potencial solución los **parámetros para Monitoreo del Desempeño Óptico** ó **parámetros OPM**, dado que permiten identificar con rapidez el lugar y causas de las fallas.

Con el fin de permitir una operación robusta, autogestionada e inteligente, los OPMs deben ser capaces de medir con precisión y reflejar rápidamente los estados físicos de los elementos de red, los trayectos y la calidad de las señales de datos que se propagan. La capacidad de medir tanto la calidad de los datos como el estado físico del trayecto de la red en tiempo real ha demostrado ser tradicionalmente difícil debido al gran número de degradaciones, la variedad de formatos de datos, la variedad de velocidades de datos y el continuo crecimiento y cambio de la estructura de la red. Como resultado, los múltiples deterioros que causan las alarmas deben ser aislados, localizados y compensados, requiriendo un monitoreo en tiempo real y un control dinámico de retroalimentación.[10]

Entonces los parámetros específicos que una red puede querer monitorizar van desde los más básicos hasta los altamente complejos. Aunque algunos parámetros ya están siendo monitoreados en muchas redes, por ejemplo, las redes ópticas monitorean la abrupta pérdida de energía que se produciría después de una ruptura de la fibra o de una interrupción del láser/amplificador; aún faltan muchos más por supervisar.

En redes ópticas de alta velocidad de datos hay mayor susceptibilidad a las degradaciones de señal "no catastróficas", problemas debido al transporte de la fibra, en el que hay suficiente potencia de señal óptica pero los bits de datos son irrecuperables. Cuando los canales de longitudes de onda paralelas se propagan simultáneamente a lo largo de la fibra, este escenario se vuelve más complejo. A pesar de que la calidad de la señal y la tasa de error de bits puede determinarse después de un foto-detector de alta velocidad, tal recuperación de la señal no puede proporcionar fácilmente la localización y causa del problema; además, la información de fase de la señal se perderá usando la detección directa común y el origen del problema podría seguir siendo un misterio.[10]

Aunque las causas de fondo no pueden especificarse de antemano porque incluyen todas las diversas fallas de los componentes, podría ser útil dividir las deficiencias en efectos de fallas de los componentes o en deficiencias de transmisión óptica, que puedan ser medidas individualmente. En la figura 2.1 se puede apreciar las diferentes degradaciones o deficiencias ópticas dentro de la red que necesariamente deben ser supervisadas dentro del contexto de OPM.

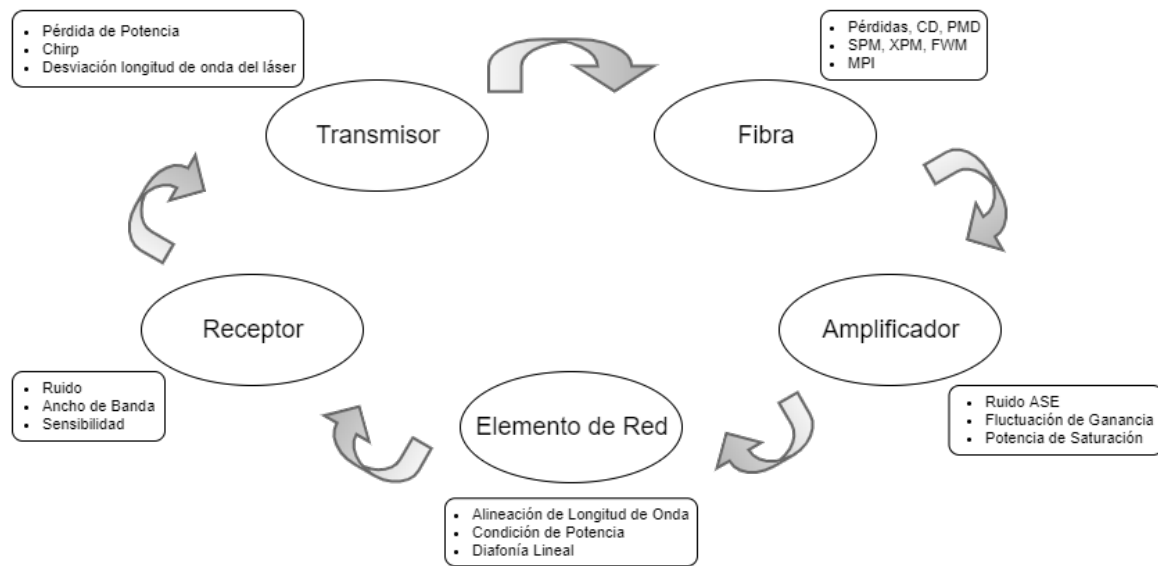


Figura 2.1: Visión general de las diferentes deficiencias ópticas dentro de la red.[10]

Como se ha visto es de gran importancia que los sistemas actuales de fibra óptica, permitan monitorear la mayoría de estas deficiencias, ya sea individualmente o mediante parámetros que reflejen los efectos de estas degradaciones en la red. En este contexto, para una red WDM existen diversos parámetros de monitoreo como lo son: factor Q, BER, relación señal a ruido óptica (OSNR, Optical Signal to Noise Rate), entre otros, los cuales están definidos por la recomendación UIT-T G.697[29].

2.2.1. Diagrama del Ojo

Es una técnica muy utilizada para analizar las formas de ondas en telecomunicaciones digitales. El diagrama consiste en la superposición de las distintas combinaciones posibles de unos y ceros en un rango de tiempo o cantidad de bits determinados. Dichas señales transmitidas por el enlace, permiten obtener las características de los pulsos que se propagan por el medio de comunicación, sean estos por medio de fibra óptica, coaxial, par trenzado, enlaces satelitales, etc.[13] Mediante la obtención de las características de los pulsos, es posible inferir parámetros de monitoreo como el factor Q, la BER, el Jitter, etc. En la figura 2.2 se observa un ejemplo básico del diagrama de ojo, generado por la combinación y superposición de unos y ceros.

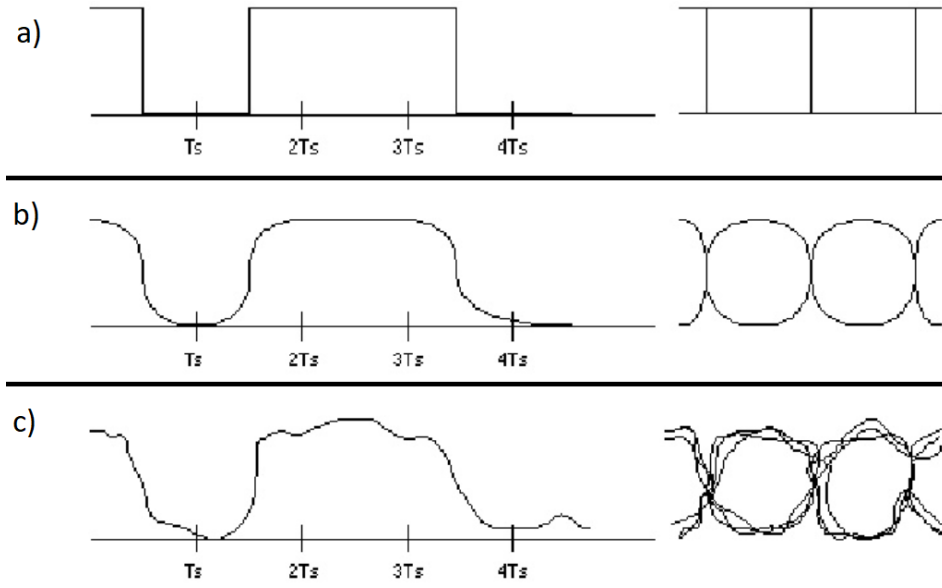


Figura 2.2: Diagrama de Ojo para una señal binaria. a) Pulso ideal. b) Pulso real limitado en banda. c) Pulso real distorsionado.[11]

2.2.2. Factor de calidad Q

El factor Q se define como la relación señal/ruido eléctrica (ESNR) en la entrada de un circuito de decisión de un receptor. La relación ESNR muestra todos los deterioros que los defectos ópticos y eléctricos producen en el punto examinado dentro de la red óptica. Si no se puede efectuar una verdadera medición de la BER (por ejemplo, debido al tiempo que se necesita para la prueba, al acceso a la prueba, etc.), se puede utilizar el método del factor Q para obtener una evaluación de la calidad de funcionamiento que se puede esperar cuando la red está en servicio.[12] Es determinado con la siguiente formula:

$$Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (2.1)$$

donde μ_1 y μ_0 son los niveles medios de tensión de los niveles lógicos 1 y 0. σ_1 y σ_0 son las desviaciones típicas de la distribución de ruido en los niveles lógicos 1 y 0. El factor Q se suele expresar en decibelios más que en valores lineales:

$$Q(\text{decibelios}) = 20 \times \log_{10}(Q(\text{lineal})) \quad (2.2)$$

En enlaces ópticos, la distorsión hace que se pierda la forma de distribución gaussiana, sin embargo, estas distorsiones afectan principalmente a las regiones superiores de la distribución. Por lo tanto, la región donde se registra superposición, es la que representa la probabilidad que se produzcan errores, como se observa en la figura 2.3.

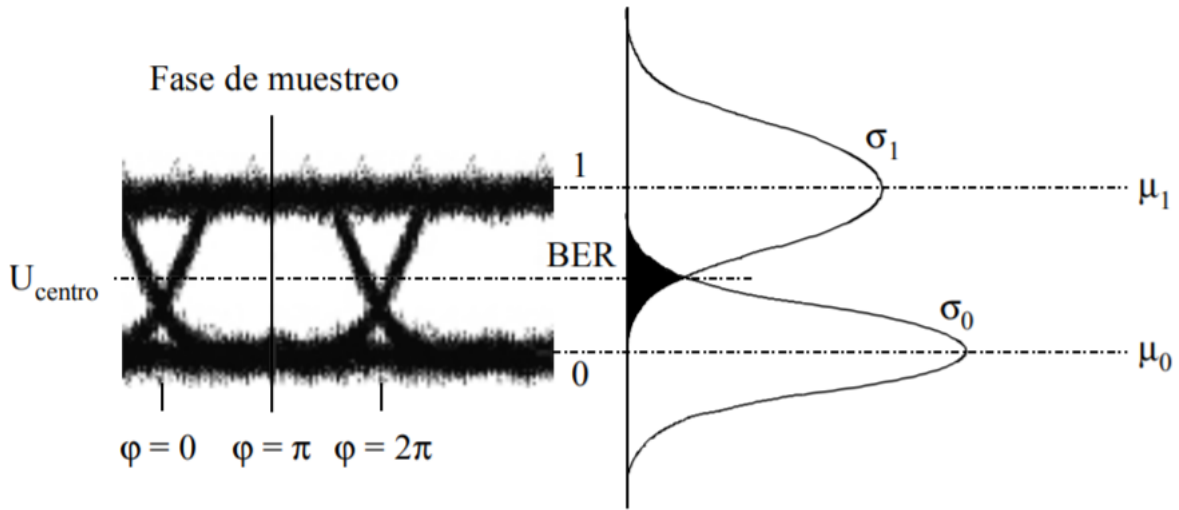


Figura 2.3: Relación entre la función de densidad de probabilidad y la tasa de errores en los bits.[12]

2.2.3. Tasa de Error de Bit (BER)

Se utiliza como un parámetro importante en la caracterización del rendimiento de los canales de datos. Como su nombre indica la tasa de error de bit se define como la tasa a la cual ocurren errores en un sistema de telecomunicaciones. Esto puede traducirse directamente en el número de errores que se producen en una cadena de un número determinado de bits, ó, como la probabilidad de recibir erróneamente un bit transmitido [30], tal como se aprecia en la figura 2.3. Se puede definir la BER dentro un intervalo de tiempo definido, como:

$$BER = \frac{\# \text{ Bits Errados}}{\text{Total de Bits Transmitidos}} \quad (2.3)$$

A diferencia de muchas otras formas de evaluación, la tasa de error de bit, la BER evalúa el rendimiento completo de extremo a extremo de un sistema, incluyendo el transmisor, el receptor y el medio entre ambos. De esta forma, la tasa de error de bit, permite comprobar el rendimiento real de un sistema en funcionamiento, en lugar de probar los componentes y esperar que funcionen satisfactoriamente cuando estén en su lugar.[30] Según lo establecido por la ITU-T, los valores usuales de BER que permiten un correcto funcionamiento del enlace óptico, están alrededor de 10^{-12} , es decir, un bit erróneo por cada 10^{-12} bits transmitidos [12].

2.2.4. Jitter

Es una desviación de fase respecto a la posición en el tiempo de una señal la cual se propaga por un canal de transmisión. Es un efecto totalmente indeseable para los sistemas de comunicación, dado que introduce problemas en el canal, los cuales, si no

son tratados apropiadamente, pueden degradar parcial o totalmente el desempeño del enlace. El jitter puede causar errores en recepción, pues el receptor se vería afectado, haciendo que el reloj difícilmente recupere el sincronismo, de ser así, la BER se vería altamente degradada, además de producir interferencia intersimbólica (ISI), debido a que ocurre un desplazamiento de las señales que componen el pulso, por ende se mezclan, observar en la figura 2.4.[13]

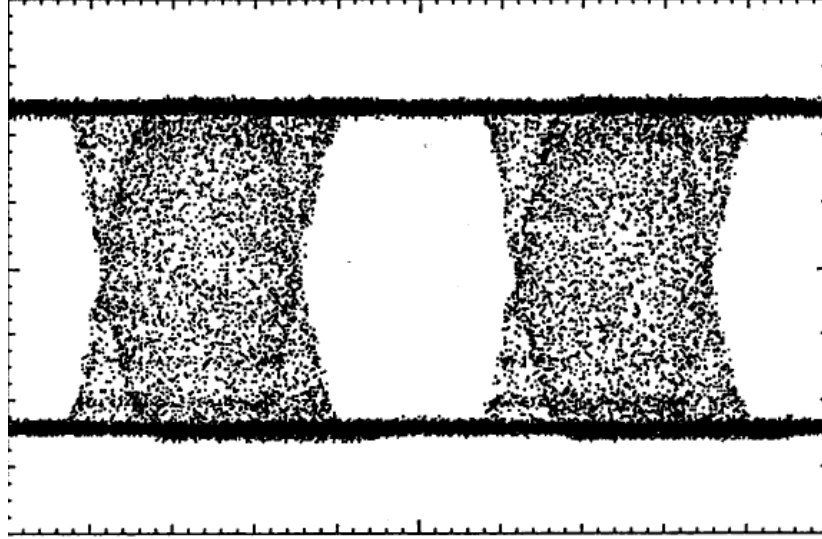


Figura 2.4: Diagrama de ojo con un desfase de 0.5 veces el periodo de bit.[13]

2.2.5. Relación Señal a Ruido Óptica (OSNR)

La relación señal/ruido óptica (OSNR) se utiliza para cuantificar el grado de interferencia del ruido óptico en las señales ópticas. Es la relación entre la potencia de la señal de información y la potencia del ruido dentro de un ancho de banda definido [31]. La OSNR[dB] puede calcularse de acuerdo a la ecuación:

$$OSNR[dB] = 10 \log_{10} \left(\frac{P_i}{N_i} \right) + 10 \log_{10} \left(\frac{B_m}{B_r} \right) \quad (2.4)$$

Ecuación 2.4 obtenida de [32], donde:

- P_i es la potencia de la señal óptica en el i -ésimo canal.
- N_i es el ancho de banda de ruido equivalente.
- B_m es la potencia de ruido introducida dentro del B_m .
- B_r es el ancho de banda óptico de referencia, que suele ser de 0,1 [nm].

Gracias a este parámetro es posible determinar cuán lejos puede viajar una longitud de onda antes de la regeneración, cuantas veces es posible introducir etapas de amplificación, además sirve como indicador de referencia para la evaluación del rendimiento de los sistemas de transmisión óptica. Por ejemplo las redes DWDM necesitan operar por encima de su límite OSNR para asegurar una operación libre de errores.[31]

2.3. Metodología de Simulación

Como tal el trabajo de grado a desarrollar es de tipo experimental, en el cual se pretende simular y comparar mediante una serie de parámetros de monitoreo óptico, los cuales serán descritos más adelante, una red de transporte de datos de fibra óptica, previamente estandarizada en el proyecto NG-PON I, versus esta misma con la adición de las diferentes formas de llevar a cabo una técnica de modulación óptica basada en la técnica de Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales.

El sistema a simular, una red de transporte óptica, se clasifica como un sistema combinado puesto que cuenta con sub-sistemas que siguen filosofías continuas o discretas, estas son, continuas en donde las variables de estado del sistema evolucionan de modo continuo a lo largo del tiempo; y discretas que se caracterizan porque las propiedades de interés del sistema cambian únicamente en un cierto instante o secuencia de instantes, y permanecen constantes el resto del tiempo.

Por otra parte, el sistema se pretende representar, mediante un modelo **Dinámico**, que permita deducir cómo las variables de interés del sistema en estudio evolucionan con el tiempo, en este caso la señal de transmisión óptica; **Estocástico**, pues requiere de una o más variables aleatorias para formalizar las dinámicas de interés, en consecuencia, el modelo no genera un único conjunto de salidas cuando es utilizado para realizar un experimento, sino que los resultados son utilizados para estimar el comportamiento real del sistema; y **Discreto** para representar la evolución de las variables de interés de forma discreta.[33]

Se pudo definir el modelo adecuado para el sistema a simular, siguiendo la metodología de simulación con enfoque práctico[34]; la cual se constituye de una serie de etapas, algunas previamente desarrolladas, que serán descritas a continuación:

- Definición del sistema: Realizar un análisis previo y determinar las posibles interacciones con diferentes sistemas, restricciones, variables involucradas y las medidas de efectividad a usar con el objetivo de definir el sistema y dejar claro los resultados que se desean obtener.
- Formulación del modelo: Después de definir los resultados, se debe elaborar el modelo que permita alcanzar esos resultados deseados. Para eso es necesario determinar las variables que afectan el sistema, sus relaciones lógicas y el diagrama de flujo que describe el modelo.

- **Colección de datos:** Se debe definir con claridad y exactitud los datos que el modelo va necesitar para alcanzar con los resultados deseados. La información necesaria se encuentra normalmente en registros, trabajos, opiniones de expertos o experimentación.
- **Implementación del modelo:** Con el modelo definido, el siguiente paso es definir las herramientas a utilizar de acuerdo a las necesidades del proyecto.
- **Validación:** Mediante esta etapa, es posible detectar las falencias en la formulación del modelo o las variables involucradas.
- **Experimentación:** Consiste en generar datos hasta que estos sean los deseados y realizar un análisis de los parámetros indicados. Este paso se realiza una vez que el modelo ha sido validado.
- **Interpretación:** En esta etapa de estudio, se deben comprender y representar los resultados obtenidos de la simulación con el fin de tomar la mejor decisión y mejorar los resultados.
- **Documentación:** Dos tipos de documentación son requeridas: la primera se refiere a la de tipo técnico, es decir, la que describe la forma de procesamiento de los datos. La segunda plantea la inclusión de un manual de usuario, con el cual se facilite la interacción y uso del modelo desarrollado.

2.3.1. Diagrama de Flujo de Simulación

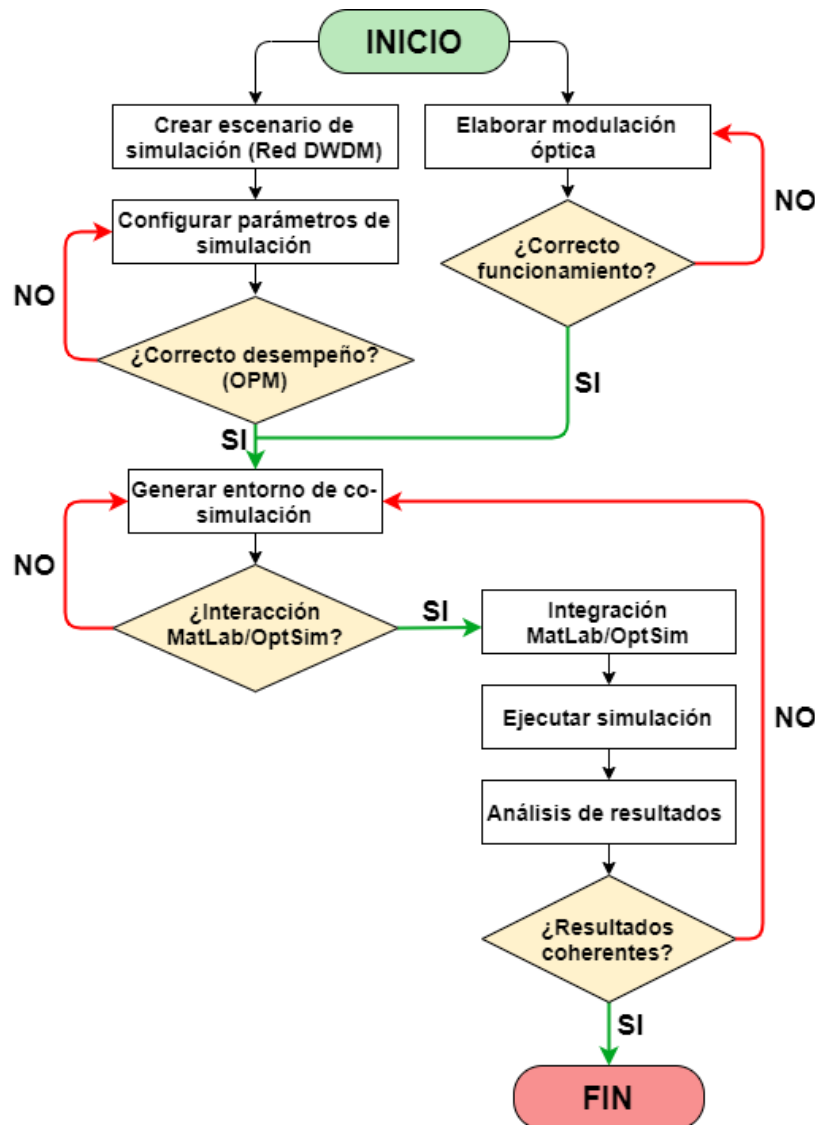


Figura 2.5: Diagrama de flujo empleado para llevar a cabo el modelo de simulación.

2.4. Definición del escenario de simulación

Con base en la teoría mostrada en el capítulo 1, un modelo de red simplificado debe ser definido, el cual posee diferentes características según los requerimientos de red especificados, incluyendo equipos comerciales, recomendaciones de la ITU-T y parámetros de desempeño, con el fin de observar el rendimiento de la red.

2.4.1. Caracterización del entorno de simulación

Se parte de la tecnología DWDM punto a punto unidireccional, pues permite el envío de información en un solo sentido, haciéndose necesaria la implementación de sistemas con doble fibra con el fin de lograr comunicación completa, sin embargo, resultan fáciles de instalar y operar, además posibilitan la transmisión de datos a altas velocidades mediante enlaces de larga distancia.

La fibra óptica utilizada a lo largo de un enlace, es la Standar SM, pues permite alcanzar largas distancias a altas tasas de transmisión. El coeficiente de dispersión en este caso es de 17 ps/nm*Km y el valor de atenuación para redes de 1575nm, corresponde a 0.275 dB/Km.

El estándar G.987.1 de la ITU, recomienda la banda que comprende la región que va desde los 1575 a los 1580 nm. Para el desarrollo del presente trabajo de debe partir con una red que posea una velocidad neta de 10 Gbps, se decide implementar inicialmente 4 canales de 2.5 Gbps cada uno, con un espaciamiento típico de 100 GHz, esto con la finalidad de disminuir los posibles efectos de la interferencia de canal adyacente. Teniendo esto en cuenta, el plan de frecuencias que incluye los canales a utilizar en el desarrollo del trabajo de grado se observan en la tabla 2.2:

	Longitud De Onda (nm)	Frecuencia Central Nominal (THz)
Canal 4	1575.00	190.344
Canal 3	1575.82	190.244
Canal 2	1576.65	190.144
Canal 1	1577.48	190.044

Tabla 2.2: Plan de Frecuencia de los 4 Canales

Por otra parte, existen dos tipos de láser utilizados para la transmisión de datos: sintonizables y de onda continua. El láser de onda continua es utilizado actualmente en redes ópticas, debido a la alta velocidad de transmisión que maneja y a que cuenta con mayor vida útil, siendo seleccionado en este presente trabajo de grado. La potencia de transmisión; según la recomendación G.691 aplicada a redes DWDM a 10Gbps, debe estar en un rango de 0 a 6dBm.

En cuanto al formato de modulación, se hace necesaria la implementación del formato de modulación básico NRZ-OOK. En redes DWDM, se implementa modulación externa debido a que se hace un mejor control del chirp , además no limita la velocidad del láser.

La distancia máxima alcanzada para las redes XG-PON según el estandar G.987.1 de la ITU es de 60 Km, esta distancia maxima en las redes PON es alcanzada sin la necesidad de usar amplificadores.

2.4.2. Entorno de simulación

Dados los objetivos del presente trabajo de grado, se define el siguiente escenario de simulación, partiendo de una velocidad de transmisión nominal de 2.5Gbps, en 4 canales multiplexados para alcanzar una velocidad de 10Gbps (4x2.5Gbps).

En la tabla 2.3 se definen las principales características de las tres diferentes secciones presentes en el sistema de comunicación.

Sección	Características
Tx	Modulador óptico Mach-Zehnder Filtros Bessel de orden 6 Laser CW, 1MHz de FWHM, 0dBm Banda L, 1575-1580nm 100GHz de espaciamiento Velocidad de transmisión de 2.5GHz
Canal	Estándar ITU-T G.987 Fibra SSMF-28, 60 Km
Rx	Sensibilidad de -30 dBm Filtro eléctrico tipo Bessel de orden 6 Filtro óptico de coseno rizado

Tabla 2.3: OPMs Back to Back

Mediante la configuración y combinación de los elementos anteriormente mencionados, se logra generar el tipo de enlace planteado. Cabe aclarar que es posible la inclusión de nuevos dispositivos a lo largo del desarrollo del presente trabajo de grado, con el fin de alcanzar los objetivos planteados.

En la figura 2.6 se observa la red de prueba para el escenario de simulación el cual se ha implementado con el formato NRZ-OOK. Una de las particularidades de la implementación de este formato de modulación, es su fácil configuración, dada la cantidad de elementos utilizados para generar una forma de onda NRZ. El transmisor requiere un driver NRZ rectangular, un láser de modulación externa y un modulador MZ de seno cuadrado. En la sección del receptor solo se requiere un filtro eléctrico y óptico centrado a la frecuencia de trabajo y un receptor con una sensibilidad máxima de -30dBm.

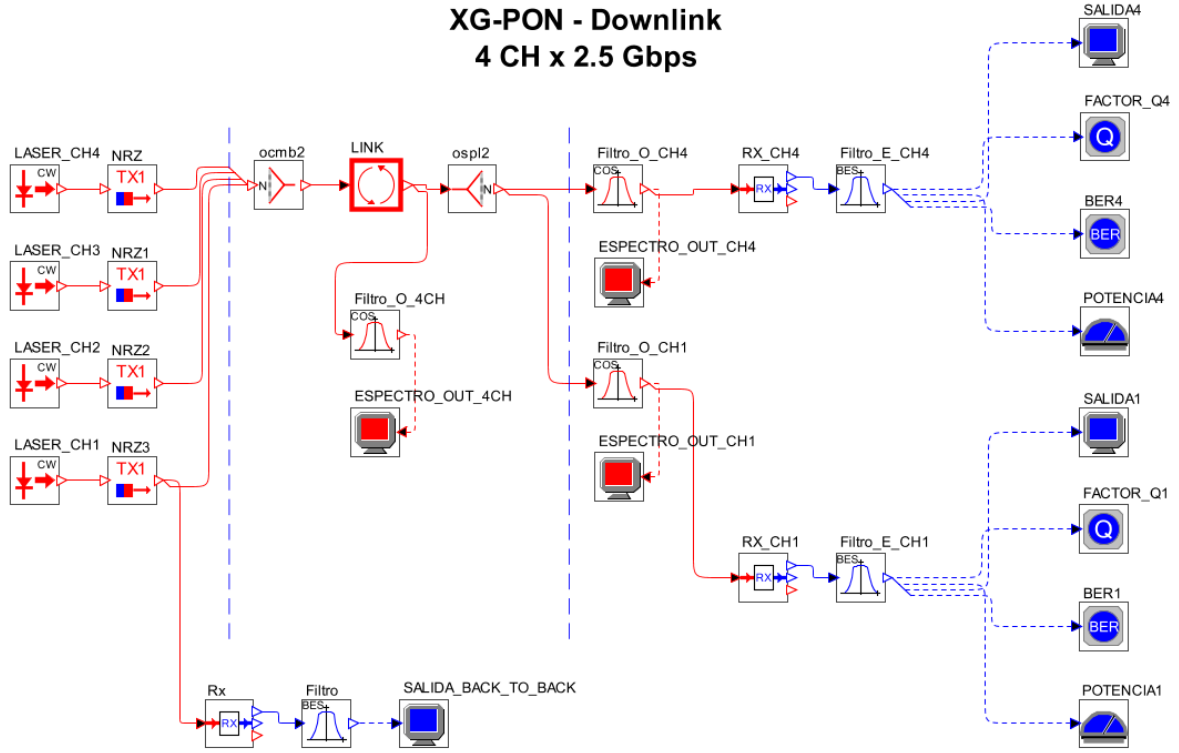


Figura 2.6: Escenario de simulación

Configuración Back to Back

Aquí se obtienen las condiciones iniciales de funcionamiento del formato NRZ-OOK con respecto a la BER, OSNR, y los diferentes parámetros de monitoreo óptico tenidos en cuenta en el presente trabajo. Los resultados obtenidos corresponden a las medidas en un enlace óptico ideal en el que no se consideran imperfecciones de canal, por tal razón serán considerados durante el transcurso del análisis de resultados que arroje el trabajo de grado, como el patrón de referencia empleado para evidenciar el efecto negativo originado por las diversas degradaciones.

En el lado del transmisor se hace uso de un láser de onda continua (CW, Continuous Wave) con (FWHM, Full Width at Half Maximum = 1 MHz), moduladores ópticos externos Mach-Zenhnder y filtros bessell de orden 6.

En la tabla 2.4 se puede observar los valores obtenidos para los diferentes parámetros de monitorio óptico.

BER	1×10^{-40}
Jitter (ns)	0,0654464
Factor Q (dB)	40

Tabla 2.4: OPMs Back to Back

Canal

La figura 2.7 muestra el espectro óptico de los cuatro canales.

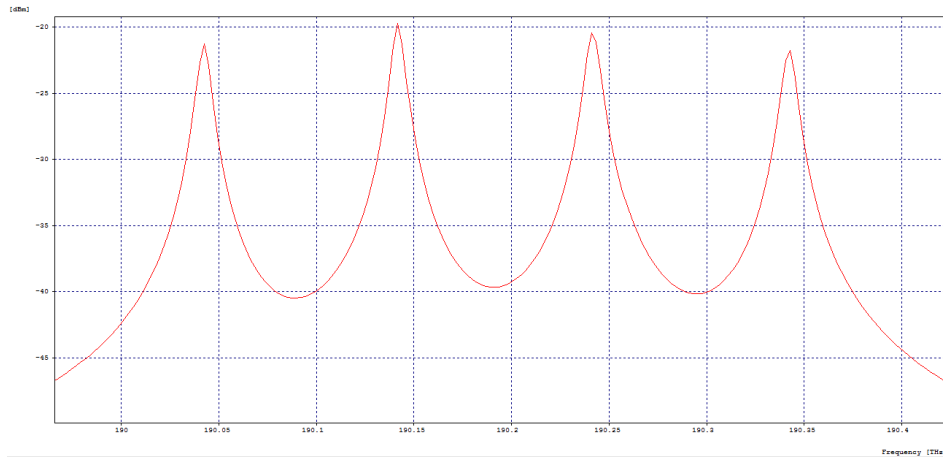


Figura 2.7: Espectro Óptico de los 4 Canales.

Recepción

Al recibir las señales de los cuatro canales, estas se deben separar mediante un filtro óptico.

Cuando se han filtrado los cuatro canales, se puede observar la salida de cada uno de estos, las figuras 2.8 y 2.9 muestran el diagrama de ojo de la recepción del canal 1 y el canal 4 respectivamente.

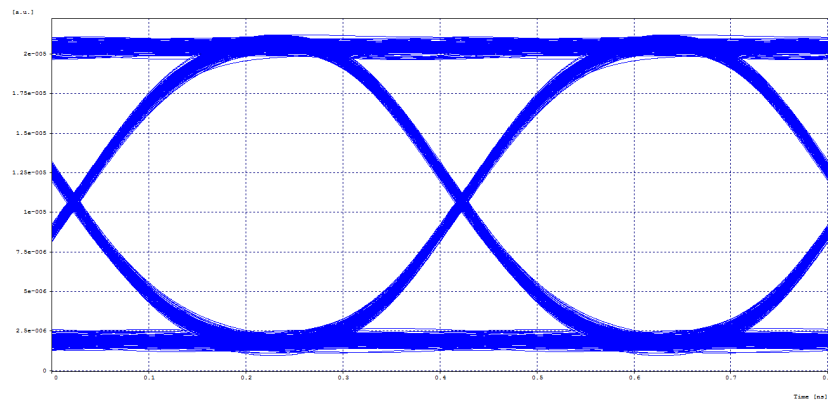


Figura 2.8: Diagrama del Ojo del Canal 1.

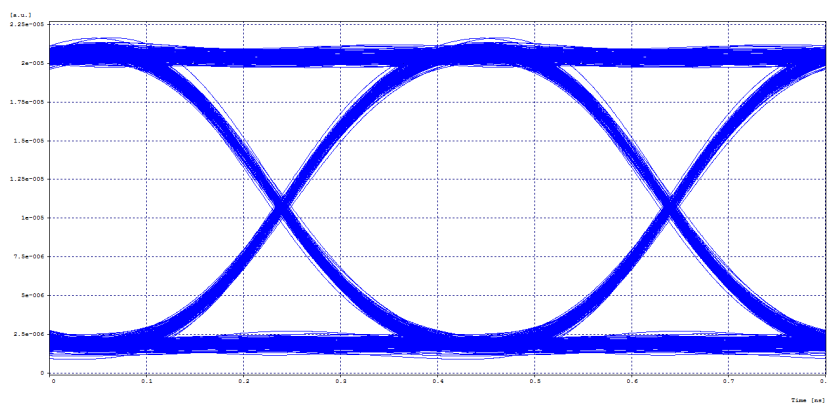


Figura 2.9: Diagrama del Ojo del Canal 4.

En la tabla 2.5 se puede observar los valores obtenidos para los diferentes parámetros de monitorio óptico para los canales 1 y 4 en recepción.

	Canal 1	Canal 4
BER	1×10^{-40}	1×10^{-40}
Jitter (ns)	0,0721981	0,068093
Factor Q (dB)	30,700267	30,584288

Tabla 2.5: OPMs

Bibliografía

- [1] A. Tanenbaum and D. Wetherall, *Redes de computadoras (5a. ed.)*. Pearson Educación, 2012.
- [2] W. shieh and I. B Djordjevic, *OFDM for Optical Communications*. 10 2009.
- [3] H. Schulze and C. Lüders, *THEORY AND APPLICATIONS OF OFDM AND CDMA*. Editorial John Wiley and Sons Ltd., 2005.
- [4] J. Sanchez-García and T. Plueckebaum, “Gpon and twdm-gpon in the context of the wholesale local access market,” 06 2016.
- [5] I. Liu, “Introducción a la red óptica pasiva (pon).” Available on: <https://bit.ly/36iXRad>, 2017. Accessed: 2019-10-30.
- [6] A. G. Yagüe, “Gpon y gpon doctor introducción y conceptos generales.” 05 2014.
- [7] FSAN - Full Service Access Network, “Fsan roadmap.” Available on: <http://www.fsan.org/roadmap/>, 11 2016. Accessed: 2019-10-24.
- [8] *Recommendation ITU-T G.987.1: 10-Gigabit-capable passive optical networks (XG-PON): General requirements*. 03 2016.
- [9] *Recommendation ITU-T G.9807.1: 10-Gigabit-capable symmetric passive optical network (XGS-PON)*. 06 2016.
- [10] C. C. K. Chan, *Optical Performance Monitoring - Advanced Techniques for Next-Generation Photonic Networks*. Academic Press, 2010.
- [11] M. Castillo and G. Romero, “Diagrama de ojo - comunicaciones ii,” tech. rep., Universidad Nacional Experimental Politécnica de la Fuerza Armada Bolivariana - Ing. Telecomunicaciones Nocturno, 2010.
- [12] *Recomendación UIT-T O.201: Equipo de prueba del factor Q para evaluar la calidad de transmisión de los canales ópticos*. 07 2003.
- [13] J. A. Dinamarca Ossa, “Informe de teoría de comunicaciones digitales - análisis de diagramas de ojo,” tech. rep., Universidad Técnica Federico Santa María - Departamento de Electrónica, 2002.

- [14] *Recommendation ITU-T G.987.2: 10-Gigabit-capable passive optical networks (XG-PON): Physical media dependent (PMD) layer specification*. 08 2017.
- [15] *Recommendation ITU-T G.9807.2: 10 Gigabit-capable passive optical networks (XG(S)-PON): Reach extension*. 08 2017.
- [16] *Recommendation ITU-T G.989.2: 40-Gigabit-capable passive optical networks 2 (NG PON2): Physical media dependent (PMD) layer specification*. 02 2019.
- [17] A. Valencia Miranda, *Introducción a la Ingeniería de telecomunicaciones : TINS Básicos*. Universidad Tecnológica del Perú, 2008.
- [18] P. Klenner, S. Vogeler, K.-D. Kammeyer, L. Reichardt, S. Knörzer, J. Maurer, and W. Wiesbeck, *OFDM - Concepts for Future Communication Systems*, pp. 144–150. 01 2011.
- [19] W. Yang, Y. S. Cho, J. Kim, and C. G. Kang, *MIMO-OFDM Wireless Communication*. 01 2010.
- [20] J. M. Moreno Manzanares, *Estudio tecno-economico del despliegue del estandar NG-PON2 sobre infraestructura óptica heredada*. 03 2016.
- [21] P. Notario, “Nuevos estándares pon para sistemas fttx,” pp. 1–4, Abril 2015.
- [22] VIAVI Solutions Inc, “Red óptica pasiva (pon).” Available on: <https://www.viavisolutions.com/es-es/red-optica-pasiva-pon>. Accessed: 2019-10-31.
- [23] FSAN - Full Service Access Network, “About fsan.” Available on: <http://www.fsan.org/>, <http://www.fsan.org/task-groups/oe/>, <http://www.fsan.org/task-groups/ngpon/>. Accessed: 2019-10-24.
- [24] *Recommendation ITU-T G.983.1: Broadband optical access systems based on Passive Optical Networks (PON)*. 05 2010.
- [25] *Recommendation ITU-T G.989: 40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): Definitions, abbreviations and acronyms*. 10 2015.
- [26] *Recommendation ITU-T G.989.1: 40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): General requirements*. 03 2013.
- [27] The Mathworks, Inc, “Descripción del producto matlab.” Available on: https://es.mathworks.com/help/matlab/learn_matlab/product-description.html. Accessed: 2019-10-25.
- [28] “Optsim product overview.” Available on: <https://www.synopsys.com/optical-solutions/rsoft/system-network-optsim.html>, 2019.
- [29] *Recomendación UIT-T G.697: Supervisión óptica para sistemas de multiplexación por división en longitud de onda densa*. 02 2012.

- [30] I. Poole, “Electronics notes - what is bit error rate: Ber tutorial.” Available on: <https://www.electronics-notes.com/articles/radio/bit-error-rate-ber/what-is-ber-definition-tutorial.php>. Accessed: 2020-01-28.
- [31] A. Vitols, “edge optical solutions - osnr meaning and calculation.” Available on: https://edgeoptic.com/kb_article/osnr-meaning-and-calculation/. Accessed: 2020-01-28.
- [32] Huawei, “Osnr, ber, and q value.” Available on: https://support.huawei.com/online/toolweb/resources/en/16_osnr.html. Accessed: 2020-01-28.
- [33] C. Domínguez Valente, M. A. López Octaviano, G. Martínez Martínez, B. Reyes Martínez, and M. Vázquez Hernández, “Simulacion digital.” Available on: <http://www.monografias.com/trabajos-pdf/simulacion-digital/simulacion-digital.pdf>, 4 2008. Tecnológico de estudios superiores de Jocoitlan - Ingeniería en sistemas computacionales.
- [34] R. Coss Bu, *Simulación - Un enfoque práctico*. LIMUSA NORIEGA EDITORES, 1982.

Anexo A

Titulo del anexo

Lorem Ipsum es simplemente el texto de relleno de las imprentas y archivos de texto. Lorem Ipsum ha sido el texto de relleno estándar de las industrias desde el año 1500, cuando un impresor (N. del T. persona que se dedica a la imprenta) desconocido usó una galería de textos y los mezcló de tal manera que logró hacer un libro de textos especimen