

*EFECTO DE LA TÉCNICA DE MODULACIÓN M-QAM
PARA UNA INFRAESTRUCTURA DE RED CONVERGENTE
OFDM-RoF/XG-PON A OFDM-RoF/XGS-PON*



Tesis de Pregado en Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones

*CRISTIAN DAVID QUILINDO MÉNDEZ
EDUAR FERNANDO HOYOS ZÚÑIGA*

Director:
Ms. Gustavo Adolfo Gómez

Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Grupo I+D Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones – GNTT
Universidad del Cauca

Popayán, 2020

*CRISTIAN DAVID QUILINDO MÉNDEZ
EDUAR FERNANDO HOYOS ZÚÑIGA*

*EFFECTO DE LA TÉCNICA DE MODULACIÓN M-QAM
PARA UNA INFRAESTRUCTURA DE RED CONVERGENTE
OFDM-RoF/XG-PON A OFDM-RoF/XGS-PON*

Tesis presentada a la Facultad de Ingeniería Electrónica y
Telecomunicaciones para optar por el título de:

Ingeniero en
Electrónica y Telecomunicaciones

Director:
Ms. Gustavo Adolfo Gómez

Popayán, 2020

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	IX
GENERALIDADES DE LA RED DE ACCESO ÓPTICA	1
1.1. ARQUITECTURAS DE ACCESO EN REDES DE FIBRA	1
1.1.1. Red FTTH.....	2
1.1.2. Redes PON	4
1.1.3. Redes de acceso FSAN	8
1.2. REDES CONVERGENTES	12
1.2.1. WiFi OffLoad	12
1.2.2. Voice over WiFi	15
1.2.3. Radio over Fiber	16
1.3. ESQUEMAS DE MODULACIÓN DIGITAL EN SISTEMAS ÓPTICOS	22
1.3.1. Modulación PSK.....	22
1.3.2. Modulación QAM.....	24
1.3.3. Constelaciones M-QAM.....	25
1.3.4. Consideraciones importantes QAM	27
1.4. ESQUEMAS DE MULTIPLEXACIÓN EN SISTEMAS ÓPTICOS	28
1.4.1. Generalidades de WDM	28
1.4.2. Fundamentos de OFDM	29
1.4.3. OFDM óptico	32
METODOLOGÍAS, HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN Y CASOS DE ESTUDIO	34
2.1. METODOLOGÍA DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN.....	34
2.2. METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN.....	34
2.3. HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN PARA EL DESARROLLO DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN.....	35
DISEÑO DE LA PROPUESTA DE UNA RED CONVERGENTE.....	36

RESUMEN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	36
4.1. RESUMEN.....	36
4.2. CONCLUSIONES	36
4.3. RECOMENDACIONES.....	36
BIBLIOGRAFÍA	37

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

Figura 1.1 - Escenarios de la red FTTx	2
Figura 1.2 - Topologías de red FTTH	3
Figura 1.3 - Arquitecturas de red FTTH	3
Figura 1.4 - Arquitectura PON convencional.....	5
Figura 1.5 - Evolución de los estándares PON	5
Figura 1.6 - Arquitectura G-PON	7
Figura 1.7 - Arquitectura del estándar E-PON	8
Figura 1.8 - Arquitectura XG-PON	9
Figura 1.9. Convergencia de aplicaciones y servicio de tipo FTTx.....	11
Figura 1.10 - Comparativa velocidades de las tecnologías PON.....	12
Figura 1.11 - Solución WiFi OffLoad.....	14
Figura 1.12 - Esquema básico de red VoWiFi	16
Figura 1.12 - Diagrama de constelación para QPSK	24
Figura 1.13 - Esquema en bloques de QAM.....	24
Figura 1.14 - Algunas constelaciones M-QAM.....	26
Figura 1.15 - Constelación 64-QAM rotada	27
Figura 1.16 - Sistema general de los formatos WDM	29
Figura 1.17 - Comparación CWDM y DWDM	29
Figura 1.18 - Comparación de transmisión uniportadora a multiportadora	30
Figura 1.19 - Sistema de comunicaciones utilizando OFDM	31
Figura 1.20 - Diagrama de bloques para IM/DD-OFDM.....	32
Figura 1.21 - Diagrama de bloques para CO-OFDM	33

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Características generales de redes tipo XGS-PON.....	10
Tabla 1.2 Características generales para redes NG-PON2	11

Tabla 1.3 - cambios de fase en PSK	23
--	----

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1.1 - Expresión general para PSK.....	22
Ecuación 1.2 - Ecuación QAM	25
Ecuación 1.3 - Señal M-aria.....	26
Ecuación 1.4 - Relación de ancho de banda.....	27

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

ADC:	<i>(Analog to Digital Converter). Conversor Analógico a Digital.</i>
APK:	<i>(Amplitude-phase keying). Modulación de Amplitud-Fase.</i>
A-RoF:	<i>(Analogue Radio over Fiber). Radio sobre Fibra Analógico.</i>
ASK:	<i>(Amplitude Shift Keying). Modulación por Desplazamiento de Amplitud.</i>
AUP:	<i>(Agil Unified Process). Proceso Ágil Unificado.</i>
AWGN:	<i>(Additive White Gaussian Noise). Ruido Blanco Aditivo Gaussiano.</i>
BER:	<i>(Bit Error Rate). Tasa de Error de Bit.</i>
BPSK:	<i>(Binary Phase Shift Keying). Modulación por Desplazamiento de Fase Binario.</i>
BS:	<i>(Base Station). Estación Base.</i>
CD:	<i>(Chromatic Dispersion). Dispersión Cromática.</i>
C-OFDM:	<i>(Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal Codificada.</i>
CO-OFDM:	<i>(Coherent Optical OFDM). OFDM Óptica Coherente.</i>
CP-FSK:	<i>(Continuous Phase Frequency Shift Keying). Modulación por Desplazamiento de Frecuencia de Fase Continua.</i>
CWDM:	<i>(Coarse Wavelength Division Multiplexing). Multiplexación por División de longitud de Onda Gruesa.</i>
DAC:	<i>(Digital to Analog Converter). Conversor Digital a Analógico.</i>
DD:	<i>(Direct Detection). Detección Directa.</i>
DPSK:	<i>(Differential Phase Shift Keying). Modulación por Desplazamiento de Fase Diferencial.</i>

<i>D-RoF:</i>	<i>(Digital Radio over Fiber). Radio sobre Fibra Digital.</i>
<i>DSB-SC:</i>	<i>(Double-sideband suppressed-carrier transmission). Transmisión de Portadora Suprimida de Doble Banda Lateral.</i>
<i>DWDM:</i>	<i>(Dense Wavelength Division Multiplexing). Multiplexación por División de longitud de Onda Densa.</i>
<i>DWDM:</i>	<i>(Differential Wavelength Division Multiplexing). Multiplexación por División de Longitud de Onda Diferencial.</i>
<i>EON:</i>	<i>(Elastic Optical Network). Red Óptica Elástica.</i>
<i>EVM:</i>	<i>(Error Vector Magnitude). Magnitud del Vector de Error.</i>
<i>FFT:</i>	<i>(Fast Fourier Transform). Transformación Rápida de Fourier.</i>
<i>Flash-OFDM:</i>	<i>(Fast Low-latency Access with Seamless Handoff Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Acceso Rápido de Baja Latencia con Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal sin Interrupción.</i>
<i>FSAN:</i>	<i>(Full Service Access Network). Red de Acceso de Servicio Completo.</i>
<i>FSK:</i>	<i>(Frequency Shift Keying). Modulación por Desplazamiento de Frecuencia.</i>
<i>FTTH:</i>	<i>(Fiber to the Home). Fibra Óptica Hasta el Hogar.</i>
<i>HD:</i>	<i>(High Definition). Alta definición.</i>
<i>ICI:</i>	<i>(Inter Carrier Interference). Interferencia entre Portadoras.</i>
<i>IF:</i>	<i>(Intermediate Frequency). Frecuencia Intermedia.</i>
<i>IF-DRoF:</i>	<i>(Intermediate Frequency – Digital Radio over Fiber). Radio sobre Fibra Digital a Frecuencia Intermedia.</i>
<i>IFFT:</i>	<i>(Inverse Fast Fourier Transform). Transformación Rápida Inversa de Fourier.</i>
<i>IM:</i>	<i>(Intensity Modulation). Modulación de la Intensidad.</i>

<i>IP:</i>	<i>(Internet Protocol). Protocolo de Internet.</i>
<i>ISI:</i>	<i>(Inter Symbol Interference). Interferencia Intersimbólica.</i>
<i>ISI:</i>	<i>(Intersymbol Interference). Interferencia entre Símbolos.</i>
<i>LTE:</i>	<i>(Long Term Evolution). Evolución a Largo Plazo.</i>
<i>MCM:</i>	<i>(Multi-carrier modulation). Modulación Multiportadora.</i>
<i>MZM:</i>	<i>(Mach-Zehnder Modulator). Modulador Mach-Zehnder.</i>
<i>NG-PON:</i>	<i>(Next Generation Passive Optical Network). Red Óptica Pasiva de Siguiente Generación.</i>
<i>NRZ:</i>	<i>(Non Return to Zero). No Retorno a Cero.</i>
<i>OFDM:</i>	<i>(Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal.</i>
<i>OFDMA:</i>	<i>(Orthogonal Frequency-Division Multiple Access). Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal.</i>
<i>O-OFDM</i>	<i>(Optical OFDM). OFDM Óptico.</i>
<i>OPM:</i>	<i>(Optical Performance Monitoring). Monitoreo de Desempeño Óptico.</i>
<i>PAM:</i>	<i>(Pulse Amplitude Modulation). Modulación de Amplitud de Pulso.</i>
<i>PAPR:</i>	<i>(Peak-to-Average Power Ratio). Potencia Pico a Potencia Promedio.</i>
<i>PON:</i>	<i>(Passive Optical Network). Red Óptica Pasiva.</i>
<i>PSK:</i>	<i>(Phase Shift Keying). Modulación de Desplazamiento de Fase.</i>
<i>QAM:</i>	<i>(Quadrature Amplitude Multiplexing). Modulación de Amplitud en Cuadratura.</i>
<i>Q-Factor:</i>	<i>(Quality Factor). Factor de Calidad.</i>

QoS:	<i>(Quality of Service). Calidad del Servicio.</i>
QPSK:	<i>(Quadrature Phase-Shift Keying). Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura.</i>
RAU:	<i>(Remote Antenna Units). Unidades de Antena Remotas.</i>
RF:	<i>(Radio Frequency). Radio Frecuencia.</i>
RoF:	<i>(Radio over Fiber). Radio sobre Fibra.</i>
SCM:	<i>(Subcarrier Multiplexing). Multiplexación por Subportadora.</i>
SDR:	<i>(Software Defined Radio). Radio Definida por Software.</i>
SER:	<i>(Symbol Error Rate). Tasa de Error de Símbolo.</i>
SNR:	<i>(Signal Noise Relation). Relación Señal a Ruido.</i>
SSMF:	<i>(Standard Single Mode Fiber). Fibra Monomodo Estándar.</i>
SSP:	<i>(Signal Space Diversity). Diversidad del Espacio de Señales.</i>
V-OFDM:	<i>(Vector Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal Vectorial.</i>
VoIP:	<i>(Voice over IP). Voz sobre Protocolo de Internet.</i>
WDM:	<i>(Wavelength Division Multiplexing). Multiplexación por División de Longitud de Onda.</i>
W-OFDM:	<i>(Wide-band Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal de Banda Ancha.</i>
XG-PON:	<i>(10-Gigabit-capable Passive Optical Network). Red Óptica Pasiva con capacidad de 10 Gbps.</i>
XGS-PON:	<i>(10-Gigabit-capable Symmetric Passive Optical Network). Red Óptica Pasiva con capacidad Simétrica de 10 Gbps.</i>
3GPP	<i>(3rd Generation Partnership Project). Proyecto de Asociación de 3ra Generación.</i>

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la convergencia tecnológica se ha planteado como respuesta para satisfacer los requisitos de acceso de banda ancha y seguridad en la red inalámbrica. La comunicación por fibra óptica utiliza eficientemente el ancho de banda disponible, de manera que maneja gran capacidad de transmisión de datos, así como la ventaja de tener inmunidad ante las interferencias electromagnéticas, mientras que las redes inalámbricas permiten movilidad de los usuarios. Gracias a la digitalización, las redes de telecomunicaciones son más eficientes a un menor costo, además de que permiten la introducción de nuevos servicios y aplicaciones como: telefonía sobre VoIP (*Voice over IP, Voz sobre Protocolo de Internet*), vídeo conferencia, servicios multimedia online, vídeo bajo demanda, y demás. No obstante, dado que el ancho de banda de los servicios inalámbricos y la degradación de la señal inalámbrica a lo largo de un canal de transmisión no permiten una alta velocidad de transmisión de datos, es importante impulsar la convergencia entre tecnologías inalámbricas y ópticas hasta la última milla, definido como FTTH (*Fiber To The Home, Fibra Óptica Hasta el Hogar*) y arquitecturas RoF (*Radio Over Fiber, Radio Sobre Fibra*).

En la actualidad, los servicios de comunicación móvil e inalámbrica de próxima generación ofrecen movilidad, flexibilidad y conectividad a los usuarios finales, así como acceso directo a gran cantidad de nuevos servicios y aplicaciones de banda ancha que requieren una utilización eficiente de recursos. Una de las técnicas de modulación con mayor despliegue en las comunicaciones inalámbricas es QAM (*Quadrature Amplitude Multiplexing, Modulación de Amplitud en Cuadratura*), la cual ofrece menor probabilidad de ISI (*Inter Symbol Interference, Interferencia entre Símbolos*) frente a otras técnicas de modulación digital. Con el desarrollo de formatos avanzados de modulación, como OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing, Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal*), que permite el envío simultáneo de varias subportadoras QAM independientes, se mejora el rendimiento total de la red y se crea un sistema más robusto, sin embargo, con el desarrollo de la fibra óptica y las redes basadas en paquetes, los esquemas de modulación como M-QAM, buscan transportar mayor cantidad de bits por símbolo a velocidades de transmisión de datos superiores.

Es por estos motivos que se planea la idea de analizar el efecto del esquema de modulación M-QAM cuando se realiza la migración de una red de acceso basada en la recomendación XG-PON (*10-Gigabit-capable Passive Optical Network, Red Óptica Pasiva con capacidad de 10 Gbps*) con velocidades asimétricas de 2.5/10 Gbps en el sentido descendente y 2.5 Gbps en el sentido ascendente, hacia una red de acceso XGS-PON (*10-Gigabit-capable Symmetric Passive Optical Network, Red Óptica Pasiva con capacidad Simétrica de 10 Gbps*) a velocidades simétricas del orden de los 10 Gbps, dentro del marco de una infraestructura de red

convergente RoF y con la utilización de formatos avanzados de modulación como OFDM.

ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO

En el **capítulo 1**, se especificarán aspectos básicos de la teoría que enmarca la evolución y trascendencia de las redes ópticas pasivas y, la convergencia de tecnologías de telecomunicaciones, con la finalidad de mejorar el desempeño de una red convergente utilizando esquemas de modulación avanzados. El lector obtendrá un soporte teórico para entender los conceptos que se presentarán durante el desarrollo del trabajo de investigación.

En el **capítulo 2**, se describirán las metodologías y casos de estudio utilizados para el desarrollo y simulación del trabajo de investigación. También se plasmará un concepto básico de las herramientas software de simulación disponible (Matlab, OptSim, OptiSystem) para el desarrollo del presente trabajo de investigación, para finalmente elegir la herramienta software más conveniente para la investigación.

En el **capítulo 3**, se tratará acerca del proceso de diseño e implementación a nivel de simulación de una infraestructura de red convergente, tomando en cuenta aspectos, como tipo de fibra, velocidades y técnicas de modulación específicas.

En el **capítulo 4**, se evaluarán los resultados obtenidos en la ejecución de las simulaciones, sus correspondientes conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros, alrededor del efecto de una técnica de modulación para una infraestructura de red convergente, extendiendo así la línea de investigación en lo relacionado con el presente trabajo.

CAPÍTULO 1.

GENERALIDADES DE LA RED DE ACCESO ÓPTICA

La red de acceso óptico es la tecnología más utilizada por los países desarrollados para mejorar el acceso de ancho de banda; las ventajas de la fibra óptica se observan en la baja atenuación que tiene por distancia, así como la eficiencia en el ancho de banda en comparación al cobre, bajo mantenimiento en las plantas de fibra y protección frente a ruido e interferencias electromagnéticas. Las redes de fibra llegan hasta las premisas del usuario final en entornos residenciales y empresariales con el objetivo de responder a las demandas de alto ancho de banda y alta velocidad de transmisión de datos que requieren los clientes para sus servicios y aplicaciones multimedia [1].

En el desarrollo de este capítulo, se detallan las principales arquitecturas de acceso basadas en fibra óptica y elementos específicos pertinentes para el desarrollo de la investigación; el objetivo es caracterizar la línea de investigación y ofrecer un soporte teórico al lector.

1.1. ARQUITECTURAS DE ACCESO EN REDES DE FIBRA

A finales de los 90's, un grupo internacional de operadores de red realizó un esfuerzo en conjunto para definir una familia de arquitecturas de acceso de banda ancha basado en fibra óptica, tuvieron en cuenta la importancia de lograr una red de acceso de banda ancha económicamente viable, así nace la iniciativa del grupo de trabajo FSAN (*Full Service Access Network, Red de Acceso de Servicio Completo*), impulsado por una creciente demanda de servicios de alta velocidad de datos y por la voluntad de estandarizar los avances en distribución óptica y la tecnología ATM (*Asynchronous Transfer Mode, Modo de Transferencia Asíncrono*) [2].

Con el desarrollo de internet, video bajo demanda, IPTV (*Internet Protocol TV, Televisión sobre el Protocolo Internet*), video conferencia, y demás servicios multimedia, se necesita de nuevos métodos de acceso que cumplan con los requerimientos de ancho de banda, QoS (*Quality of Service, Calidad de servicio*) e interoperabilidad con las redes de acceso convencionales. Las redes PON (*Passive Optical Network, Red Óptica Pasiva*) y AON (*Active Optical Network, Red Óptica Activa*) buscan ofrecer servicios de alto ancho de banda a los usuarios finales, mediante estrategias como: utilización de elementos activos o pasivos en la red, esquemas de modulación avanzados, altas velocidades de transmisión a grandes distancias y fibra óptica dedicada o compartida para cada usuario [3]. La red PON, por ejemplo, se ha empezado a desarrollar en redes de área metropolitana y redes de área local conocidas como FTTH, las ventajas incluyen una arquitectura P2MP

(*Point to MultiPoint, Punto a Multipunto*), alta velocidad para el acceso a internet y servicios triple play de alta calidad con capacidad para datos, voz y vídeo [4].

1.1.1. Red FTTH

Una red de acceso basada en fibra óptica se constituye como una red FTTH, en donde varios suscriptores, se conectan a un punto POP (*Point of Presence, Punto de Presencia*), oficina central o nodo de acceso, el cual contiene los sistemas de distribución ópticos necesarios para proveer de servicios y aplicaciones a los clientes, a su vez, los nodos de acceso se conectan a redes de fibra metropolitanas o redes más grandes; estas redes de acceso conectan grandes edificios, como escuelas, hospitales, empresas, hogares y negocios [5]. Para el desarrollo de la red FTTH en medios físicos, como ciudades, áreas residenciales y rurales, se tienen en cuenta factores, como CAPEX (*Capital Expenditures, Inversiones de Capital*), OPEX (*Operational expenditures, Gastos Operativos*), condiciones locales y arquitecturas de red FTTH, por ejemplo PON o Ethernet activo.

El despliegue de la fibra óptica para redes FTTx está limitado hasta un punto determinado de la red, en la figura 1.1 se presentan los diferentes tipos de redes FTTx, el punto alcanzado está determinado por la última letra, por ejemplo: FTTH, FTTB (*Fiber To The Building, Fibra Hasta El Edificio*), FTTC (*Fiber To The Curb, Fibra Hasta un Punto Remoto*), FTTN (*Fiber To The Node, Fibra Hasta El Nodo*), FTTA (*Fiber To The Antenna, Fibra Hasta La Antena*) y FTTDp (*Fiber To The Distribution point, Fibra Hasta El punto de Distribución*).

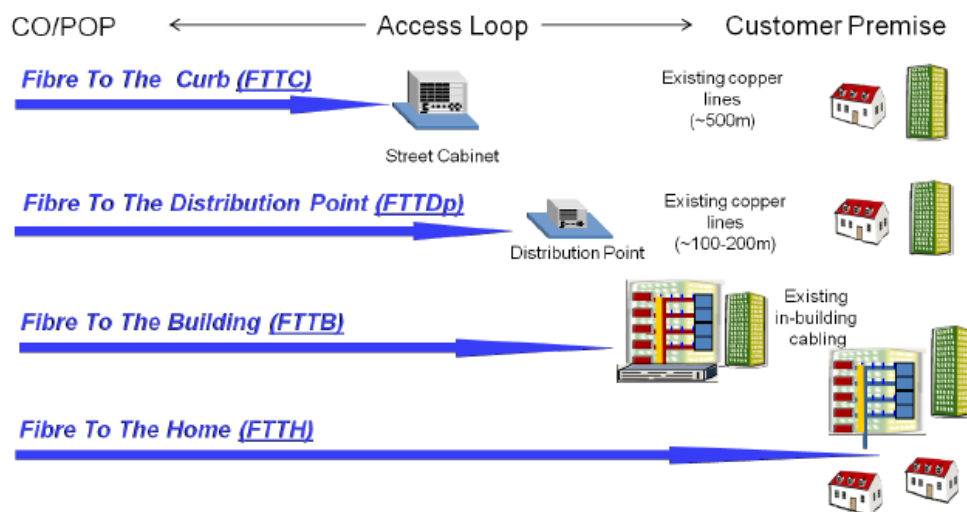


Figura 1.1 – Escenarios de la red FTTx

- Tecnologías y topologías FTTH

Las topologías utilizadas para el despliegue de la fibra son diferentes a las tecnologías utilizadas para el transporte de los datos sobre la fibra, así, la tecnología

PON utiliza una topología P2MP y la tecnología AON, conocida como Ethernet activo, utiliza una topología P2P (*Point to Point, Punto a Punto*). La topología P2P para FTTH utiliza elementos Ethernet activos en la red ubicados en la oficina central y permite que cada abonado tenga un medio de transmisión óptico dedicado, pero requiere de gran inversión al desplegar la fibra óptica desde la oficina CO hasta las premisas del usuario final. Por otro lado, la arquitectura P2MP para FTTH (también llamada PON), permite reducir los costes de la red utilizando elementos pasivos y la utilización de un mismo cable de fibra para distintos abonados, en la figura 1.2 se presentan los esquemas de las dos topologías. Los nodos RN (*Remote Node, Nodo Remoto*) pueden ser activos tal como un switch Ethernet, o pasivos como divisores ópticos pasivos y acopladores WDM (*Wavelength Division Multiplexing, Multiplexación por División de longitud de Onda*) [6].

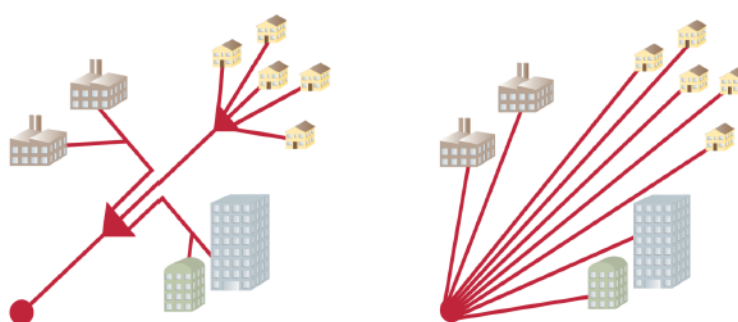


Figura 1.2 – Topologías de red FTTH

La tecnología PON – P2MP y la tecnología Ethernet – P2P, son ampliamente aceptadas y comercializadas a nivel mundial, la elección depende de factores de costo – eficiencia para los proveedores de servicios y operadores de las redes [5]. En la figura 1.3 se presentan las diferentes arquitecturas de red FTTH.

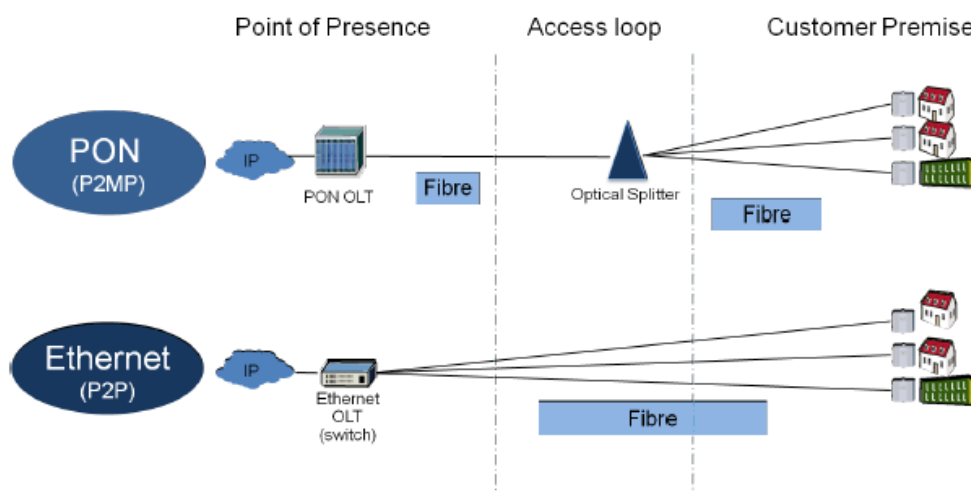


Figura 1.3 – Arquitecturas de red FTTH

Actualmente, se habla de la similitud de la tecnología FTTH y PON, sin embargo, los sistemas FTTH son un concepto más general donde se incluye la tecnología PON. La red FTTH incluye categorías de servicio, como: servicios de banda asimétricos, servicios de banda ancha simétricos, servicio telefónico tradicional e ISDN (*Integrated Services Digital Network, Red Digital de Servicios Integrados*), algunos ejemplos son: vídeo bajo demanda, servicios de radio difusión digital, juegos en línea, correo electrónico y demás.

1.1.2. Redes PON

La demanda creciente de ancho de banda en las redes de acceso ha permitido el desarrollo de las redes PON, con el objetivo de transportar por un hilo de fibra los servicios multimedia de los suscriptores, tales como telefonía tradicional, VoIP, vídeo conferencia, vídeo bajo demanda, y demás; organizaciones como FSAN, ITU (*International Telecommunication Union, Union Internacional de Telecomunicación*) y la IEEE (*Institute of Electricals and Electronics Engineers, Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos*) se encargan actualmente de producir las especificaciones, normas de interoperabilidad y funcionamiento para el acceso de banda ancha a través de fibra óptica [7].

La principal característica de las redes PON es la no utilización de componentes de potencia intermedios entre el usuario final y el punto principal de distribución, lo cual reduce el consumo de potencia y los costos de operación y mantenimiento para los proveedores de servicios; en la figura 1.4 se observa que una PON convencional consiste de OLT (*Optical Line Terminal, Terminal de Línea Óptico*) ubicada en la oficina central, ODN (*Óptical Distribution Network, Red de Distribución Óptica*) y ONU (*Óptical Network Unit, Unidad de Red Óptica*); la red comprende una conexión por “fibra de alimentación” entre la OLT y el divisor óptico pasivo, acto seguido, el divisor óptico pasivo separa la señal óptica en varias señales de baja potencia en dirección a cada ONU, mediante una “fibra de distribución”. La ONU es una interfaz de servicio con los suscriptores y la OLT se encarga de recibir los datos del proveedor de servicios, de tal manera que se brindan servicios como: PSTN (*Public Switched Telephone Network, Red Telefónica Pública Conmutada*), Internet, CATV (*Community Antenna Television, Antena de Televisión Comunitaria*) y demás, para 16 a 128 suscriptores por línea de fibra de distribución, sin embargo, la oferta de servicios y cantidad de suscriptores dependen el tipo de estándar utilizado en la red de acceso basada en fibra [8].

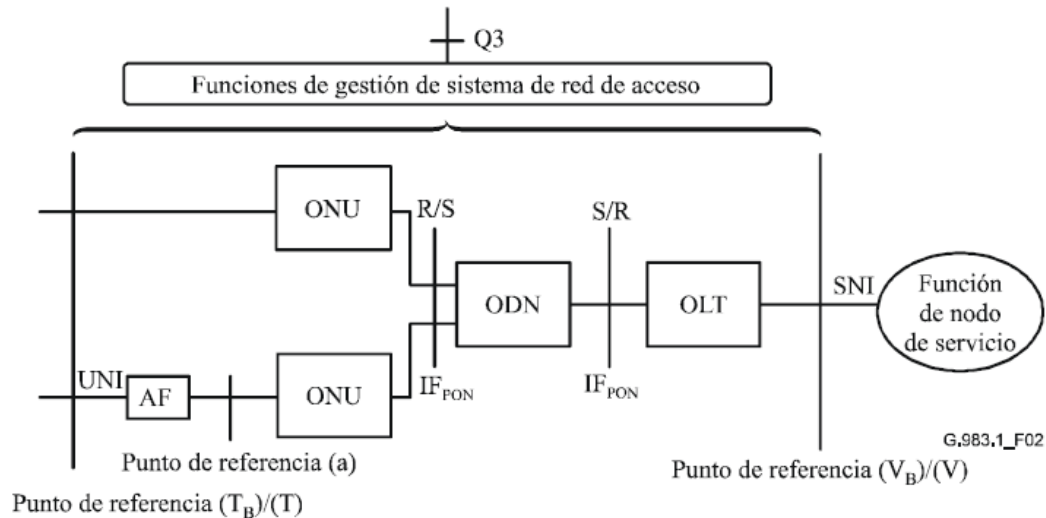


Figura 1.4 – Arquitectura PON convencional

La ODN (*Optical Distribution Network, Red de Distribución Óptica*) ubicada entre una OLT y una o más ONU, de acuerdo con la figura 1.4, ofrece uno o más trayectos ópticos. Por otra parte, se definen dos sentidos de señales transmitidas, como sentido de transmisión hacia el origen en el caso de ONU – OLT y sentido hacia el destino en el caso de OLT – ONU, así, la primera generación de redes PON utilizaba el protocolo TDMA (*Time Division Multiplexing Access, Acceso Múltiple por División de Tiempo*) en el sentido de transmisión hacia el origen.

En la figura 1.5 se presenta la evolución de la tecnología PON con su correspondiente fecha de presentación y el organismo regulador.

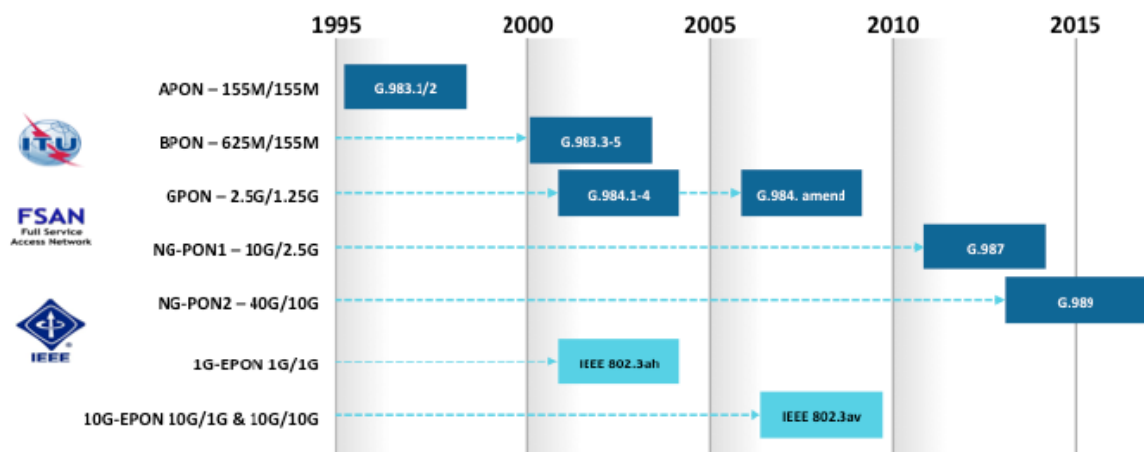


Figura 1.5 – Evolución de los estándares PON

- A-PON/B-PON

Las especificaciones técnicas para la capa TC (*Transmission Convergence, Convergencia de Transmisión*) y capa de medio físico, se encuentran dentro del estándar ITU-T G.983, en las versiones G.983.1 a G.983.8 de 2005 a 2002 [9]–[13]; este estándar fue llamado A-PON (*Asynchronous Transfer Mode-Passive Optical Network, Red Óptica Pasiva con Modo de Transferencia Asíncrono*), posteriormente actualizado a B-PON (*Broadband-Passive Optical Network, Red Óptica pasiva de Banda ancha*), con el objetivo de incluir una amplia gama de servicios de banda ancha, como video difusión y servicios de Ethernet sobre la red PON, así como proveer de una red de acceso por fibra óptica flexible y escalable [6]. Por este motivo B-PON reemplaza el uso que se le daba a ATM-PON.

El primer estándar desarrollado para las OAN (*Optical Access Network, Red Óptica de Acceso*) busca ofrecer soporte a servicios con alto ancho de banda para velocidades de 155.52 Mbps en comparación con la velocidad básica binaria de ISDN, la comunicación entre la OLT y la ONU está basada en circuitos virtuales ATM, los cuales pueden proveer distintos niveles de QoS [6]. Posteriormente, la actualización del estándar G.983 permitió que B-PON soportara velocidades en sentido descendente de 155.52, 622.08 y 1244.16 Mbps, y velocidades en sentido ascendente de 155.52, y 622.08 Mbps, B-PON utiliza la técnica TDM (*Time Division Multiplexing, Multiplexación por División de Tiempo*), tanto en el sentido ascendente como descendente y para un alcance lógico diferencial¹ de 20 km [9].

Las versiones G.983.2, G.983.3, G.983.5, G.983.6, G.983.7 y G.983.8 se enfocan individualmente en la capa de gestión y mantenimiento, calidad de servicio, asignación de ancho de banda dinámico, mecanismos de control, gestión de la red y soporte al protocolo IP, respectivamente.

- G-PON

La diversidad de servicios y aplicaciones no se hizo esperar, por tanto la necesidad de un ancho de banda eficiente, muy altas velocidades de datos y mejor gestión de la red en comparación con sus predecesoras; G-PON se presenta en el estándar ITU-T G.984, en las versiones G.984.1 a G.984.7 de 2003 a 2010 [14]–[19]. G-PON se caracteriza por su compatibilidad con los anteriores estándares, mejora la eficiencia en el transporte de servicios y soporta los requerimientos de ancho de banda para los servicios en entornos residenciales y empresariales; las características de velocidad son de 2.4 Gbps en el sentido de línea descendente y de 1.2/2.4 Gbps en el sentido de línea ascendente; la especificación también describe la capacidad de G-PON para trabajar en modo simétrico o asimétrico, con una distancia lógica diferencial de 20 km [14].

¹ **Alcance lógico diferencial**, hace referencia a la “diferencia de fibra entre dos ONU conectadas a la misma interfaz OLT-PON” [9].

G-PON ofrece una relación de división atractiva para los operadores de las redes de 1:64 y con una posterior evolución de los módulos ópticos, esta relación de división será de 1:128 [20]. En la figura 1.6 se presenta la arquitectura básica de G-PON.

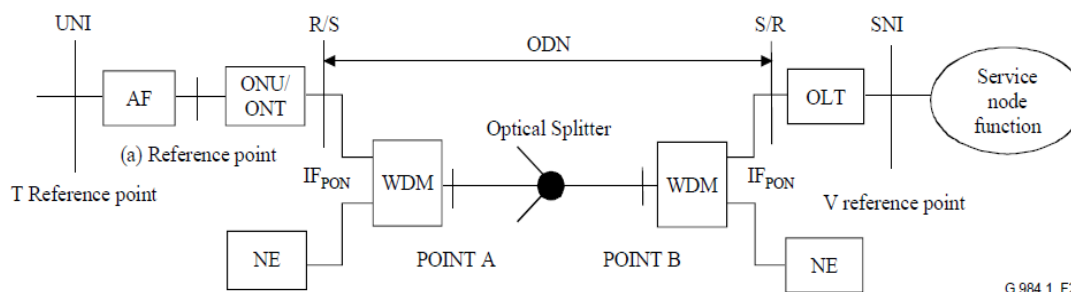


Figura 1.6 – Arquitectura G-PON

- GE-PON

La arquitectura de red GE-PON (*Gigabit-Ethernet Passive Optical Network, Red Óptica Pasiva de Gigabit Ethernet*) converge las tecnologías Gigabit – Ethernet y PON, para llegar directamente hasta el usuario final con fibra óptica y la utilización de equipos de acceso con interfaces Ethernet [21].

- E-PON

La arquitectura de red E-PON (*Ethernet PON, Red óptica pasiva Ethernet*) fue desarrollada por la IEEE dentro del estándar IEEE 802.3, cambiando el transporte de los datos a tramas Ethernet en comparación con el transporte por celdas ATM. Este estándar maneja velocidades del orden de los Gigabit y la gestión y administración de la red se realiza por medio del protocolo SNMP (*Simple Network Management Protocol, Protocolo de Gestión de Red Simple*) [21]. En la Figura 1.7 se observa una arquitectura general del estándar E-PON.

ascendente, para 2.5 Gbps en XG-PON1 y para 10 Gbps en XG-PON2, este último definido en una sección aparte posteriormente en el estándar XGS-PON en modo simétrico. Por otra parte, para el sentido de línea descendente se tiene una velocidad nominal de 10 Gbps. En la figura 1.8 se presenta un sistema XG-PON genérico.

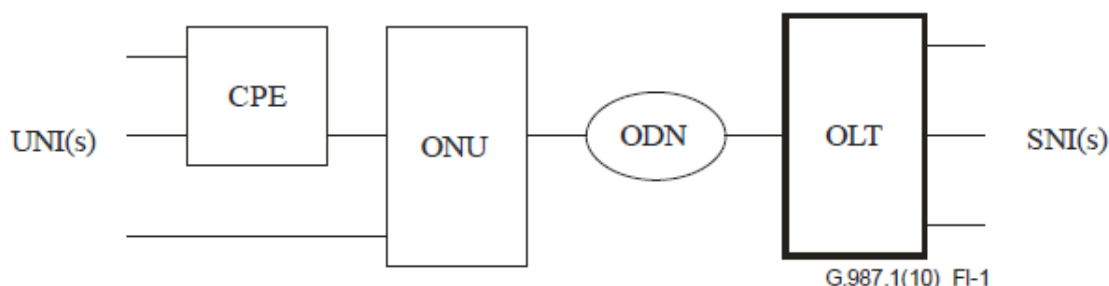


Figura 1.8 – Arquitectura XG-PON

XG-PON utiliza tramas y protocolos que mantienen la coexistencia con los estándares anteriores y también soportar tramas Ethernet, utiliza el método de encapsulación XGEM dentro de la capa TC, permitiendo flujos de tráfico individual, fragmentación y privacidad de datos, para conveniencia en la adaptación de varios tipos de datos; la relación de división en la ODN puede ser de 1:64 o 1:128, implementa asignación DBA (*Dinamic Bandwidth Assignment, Asignación Dinámica de ancho de Banda*), y finalmente, la longitud de onda utilizada en esta recomendación para el sentido ascendente se encuentra en la región de los 1310 nm y para el sentido descendente se encuentra en la región de los 1550 nm [6].

- XGS-PON

La última actualización del estándar XG-PON, llamado XGS-PON dentro de las recomendaciones ITU G.9807.1 [29] y G.9807.2 [30] se define en redes de acceso óptico para aplicaciones y servicios en entorno residencial, empresarial y red troncal móvil; se caracteriza por una topología P2MP a una velocidad de datos simétrica de 10 Gbps, así mismo, se garantiza la interoperabilidad con los estándares anteriores y el estándar NG-PON2; este estándar utiliza el encapsulamiento XGEM, permite la coexistencia con estándares anteriores soportando velocidades de línea de 2.5 y 10 Gbps, utiliza codificación FEC, posee una relación de división mínima de 1:64 con escalabilidad a 1:128 y 1:256, y también define la técnica TDMA para el sentido hacia el origen y TDM para el sentido hacia el destino [29].

El grupo de tarea FSAN dicta soluciones entorno a las redes PON, con el propósito de una migración completa a redes de tipo FTTx, manteniendo los ambientes de red, las arquitecturas, las topologías, el acceso y los estándares, para la siguiente generación de sistemas de tipo AON. La tabla 1.1 presenta los

requerimientos necesarios de redes XGS-PON, basados en los estándares sugeridos por la UIT.

REDES XGS-PON		
CARACTERÍSTICAS	REQUERIMIENTO	
Servicios a nivel de acceso	PDH	SDH
	T1 y E1	STM-64
mínima trama de empaquetamiento	Tipo Ethernet de 2000 bytes y hasta 9000 bytes	
Características de la fibra	Definidas en el estándar UIT-T G652	
Distancias del enlace	Definidos para distancias entre los 40Km y los 60Km	
Asignación Dinámica de Ancho de Banda	Reporte de estado SR-DBA y monitoreo de tráfico TM-DBA	
Aplicaciones	FTTx	
Velocidad nominal	10Gbps Simétricos	
Métodos de coexistencia	Sobre carga de longitud de onda y/o TDMA	

Tabla 1.1 Características generales de redes tipo XGS-PON

Concluida la etapa de desarrollo para NG-PON1 que termina en 2016 con la recomendación XGS-PON, comienza la segunda etapa de evolución denominada NG-PON2 con una capacidad teórica de 40 Gbps, utilizando 4 canales de longitud de onda con velocidades nominales de 10 Gbps en el sentido de línea descendente y de 2.5 Gbps en el sentido de línea ascendente, y en un futuro será posible combinar hasta 8 longitudes de onda para lograr 80 Gbps [21]. Su reléase para esta nueva generación de redes PON de servicio completo, se relacionan con los estándares ITU-T G.989.1 a ITU-T G.989.3 [31]–[33]. En la tabla 1.2 se presentan las características generales para redes NG-PON2.

REDES NG-PON		
CARACTERÍSTICAS	REQUERIMIENTO	
arquitectura	Tipo WDM y TDM mediante mecanismos de acceso	
canales	4 canales TWDM	
Tasa nominal por canal	10Gbps	
Máxima distancia alcanzable	Entre 20Km y 40Km	
Servicios a nivel de acceso	PDH	SDH
	T1 y E1	STM-64

Tabla 1.2 Características generales para redes NG-PON2

El comité europeo FTTH propone varias arquitecturas de red para diferentes escenarios de interconexión y convergencia de tecnologías, con la finalidad de una migración a redes de próxima generación y coexistencia de los diferentes estándares propuestos [5]. En la Figura 1.9 se presentan las múltiples aplicaciones de tipo FTTx.

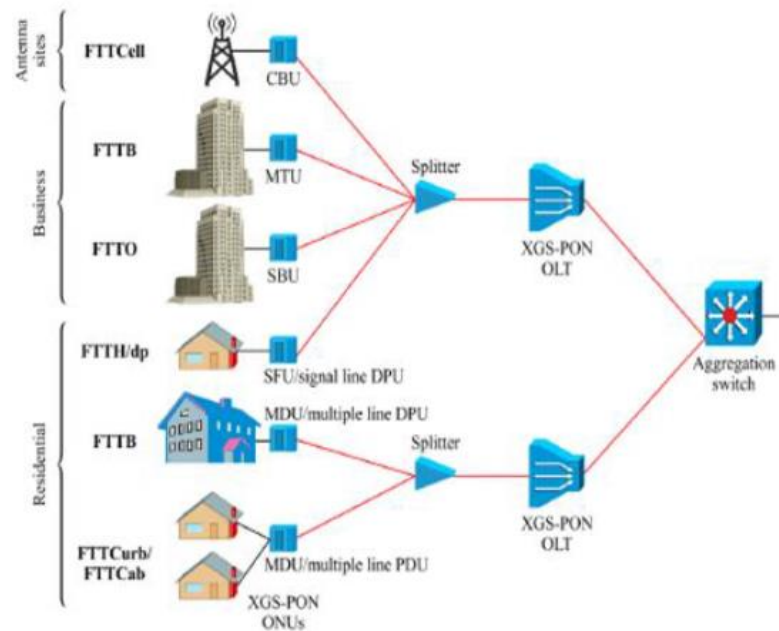


Figura 1.9. Convergencia de aplicaciones y servicio de tipo FTTx

La figura 1.10 presenta una comparativa de las tecnologías PON respecto a su velocidad en el enlace de subida y de bajada y tipo de estándar.

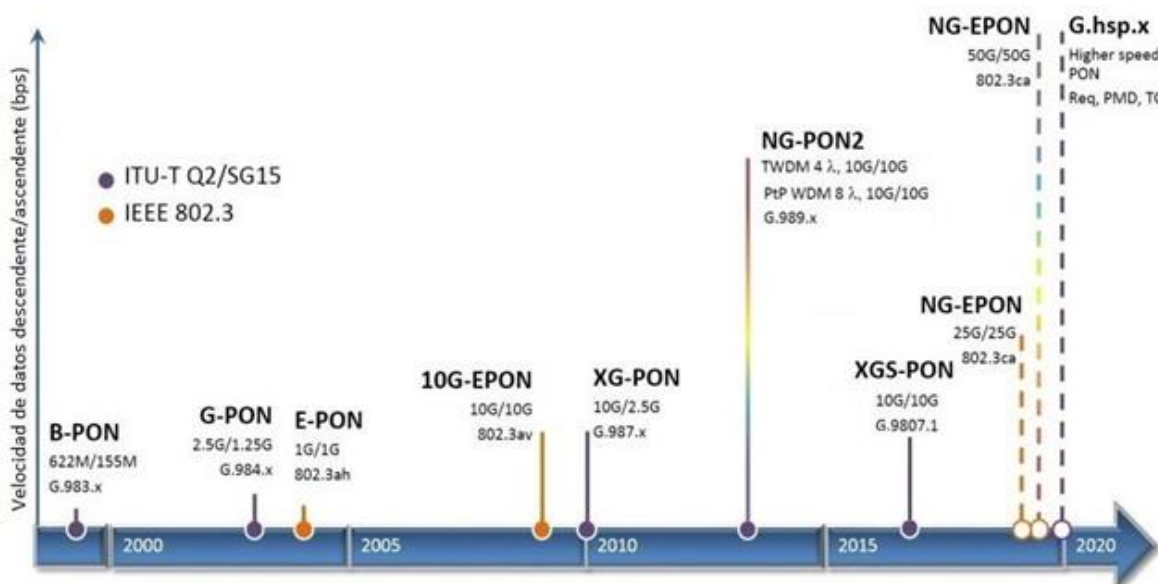


Figura 1.10 – Comparativa velocidades de las tecnologías PON

1.2. REDES CONVERGENTES

Desde hace varios años se utiliza el término convergencia de redes, refiriéndose al hecho de unificar los sistemas que permiten el tráfico de video, voz y datos, es decir, brindar diferentes servicios de telecomunicaciones en una misma infraestructura de red. La llegada de nuevas tecnologías, la creciente demanda de conectividad y transmisión de información, ha derivado en una constante convergencia de las redes actuales, en rediseñar el despliegue de las mismas, sumado a eso, hoy en día la convergencia busca mejorar las condiciones de accesibilidad, ancho de banda y conseguir altos niveles de QoS [34].

Existen diversos tipos de sistemas de comunicación donde se ha presentado la convergencia de algunas redes o tecnologías, a continuación se mencionan algunos casos.

1.2.1. WiFi OffLoad

El uso de dispositivos inteligentes es cada vez mayor y tiene una relación directa con el crecimiento exponencial del tráfico de datos móviles. Se espera que para el 2022 hayan 12.3 billones de dispositivos móviles conectados, es decir 1.5 dispositivos por persona en base a la población mundial proyectada (8 billones de habitantes), el tráfico mundial de datos móviles se multiplicará por siete entre 2017

y 2022 con una tasa de crecimiento anual del 46%, alcanzando 77.5 exabytes por mes para 2022 y el 79% de dichos datos será video [35].

Para los operadores móviles, debido a la infraestructura desplegada para brindar sus servicios, resulta un verdadero reto soportar el incremento del tráfico de datos, pues a menudo los usuarios llevan al límite la capacidad de las redes 3G/4G en zonas urbanas, especialmente en las que se aglomera multitud de personas y es alto el volumen de usuarios conectados; como los centros comerciales, terminales de transporte, etc. Además, en ambientes interiores (edificios) la cobertura de red celular es muy baja [FullText2]. Una solución a esta problemática es trasladar la descarga de datos móviles a redes complementarias o tecnologías auxiliares con una técnica conocida como “*Offloading*”, la cual se puede definir como el porcentaje de bytes descargados a otro canal como Wi-Fi en comparación al total de bytes generados por los usuarios móviles que originalmente son dirigidos a una red de acceso celular, las principales tecnologías de redes complementarias para descarga de datos son Femtoceldas o Wi-Fi [US9232].

- Definición

WiFi Offload es una técnica innovadora que permite el enrutamiento del tráfico de una red celular basada en estándares 3GPP (*3rd Generation Partnership Project, Proyecto de Asociación de 3ra Generación*) a otra tecnología de acceso alternativo con cobertura local como lo es WiFi, favoreciendo a los operadores ya que los dispositivos inteligentes están equipados con capacidad de conexión WiFi, los sistemas WiFi utilizan espectro sin licencia, se implementan relativamente a bajo costo, se reducen los gastos de mantenimiento y operación respecto a las redes de acceso celular [T-U]. Esta solución resulta algo extensa pero a nivel general consiste en instalar estratégicamente puntos de acceso WiFi en interiores y exteriores, los cuales se acoplan al core de la red móvil y al sistema de soporte de negocios del operador.

- Infraestructura de red

La red WiFi Offload se encuentra constituida por las siguientes partes [CD 86]:

- RAN WiFi (*Radio Acces Network WiFi*, Red de Acceso de Radio WiFi)
- WAG (*WiFi Acces Gateway*, Puerta de enlace de acceso WiFi)
- Elementos de integración del core de paquetes 3G/4G

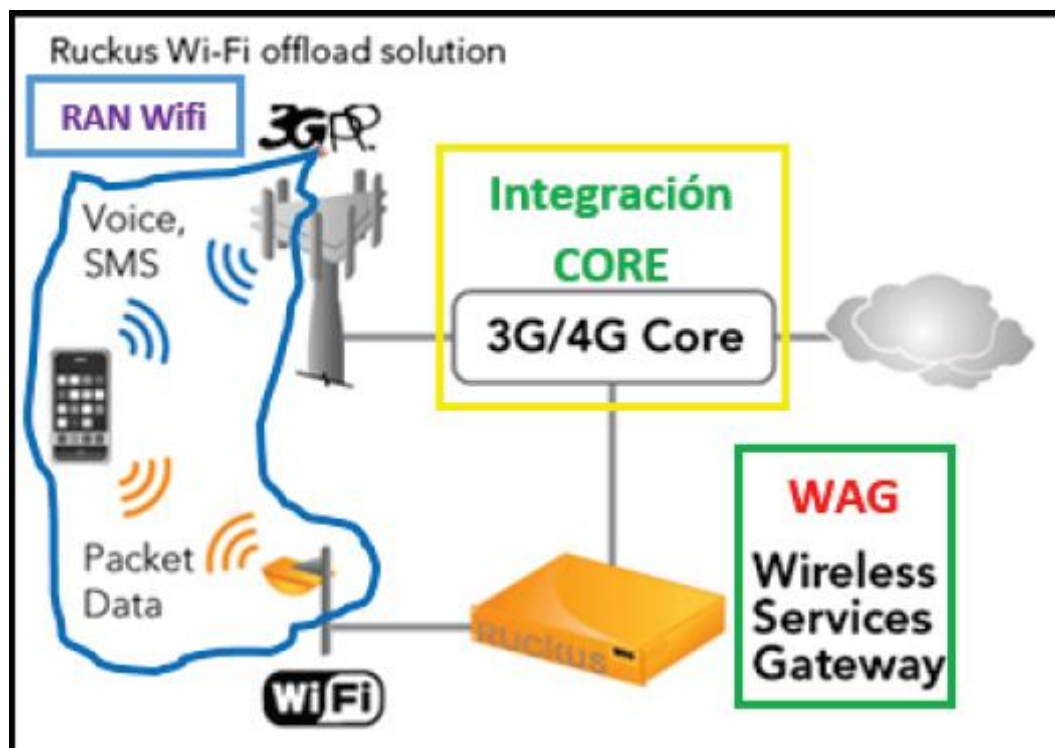


Figura 1.11 – Solución WiFi OffLoad

- **RAN WiFi:** permite la conexión a través de enlaces radio, entre dispositivos individuales que cuenten en su hardware con un módulo WiFi [11]
- **WAG:** Establece los parámetros de funcionamiento de la red WiFi, controlando la red de acceso y el core de la red móvil. Su principal es dar una autenticación de confianza de acuerdo al estándar 3GPP.[12]
- **Elementos de integración del core de paquetes 3G/4G:** componen la parte central de la red y proveen los servicios la usuarios, se encarga de direccionar el tráfico de datos, el usuario envía los datos a través de un router mediante la RAN, el core de la red los recibe y los envía a su destino. [13]

- Características de la red

- Ofrece servicios de datos de alta calidad a los usuarios a un menor costo por byte. [Alepo][
- Permite a los operadores de redes móviles entregar un datos móviles con un bajo costo operativos [Alepo][8]

- Enruta los datos de una red móvil a una red WiFi, gracias a la transferencia de un parte del tráfico de la red celular a los puntos de acceso WiFi.
- Trabaja en modo dual (celular – WiFi) lo cual permite al usuario alta capacidad de acceso, velocidad y una mejor experiencia de conexión y navegación a través de la red.[a survey]
- Se optimiza la red mediante la descarga de tráfico de datos en banda ancha
- Se libera bandas de frecuencia para un mejor desempeño de la red 3G/4G, supliendo las demandas de otros usuarios.

1.2.2. Voice over WiFi

El uso de WiFi se ha incrementado entre un 40% y 60% en los últimos años, ofreciendo gran despliegue y cobertura en todo el mundo gracias al uso doméstico y a la ubicación de múltiples puntos de acceso en interiores y exteriores (tiendas, cafés, hoteles, vehículos de transporte, aeropuertos, aviones), cada vez es más generalizado el acceso a las redes WiFi [ClsCO]. Pensando en esto y debido a las limitaciones que tiene las redes móviles y fijas de telefonía, los operadores tanto de red inalámbrica como las empresas que brindan servicio de voz, se plantean aprovechar la infraestructura de red WiFi existente para dirigir el tráfico de voz a través de esta misma. [epdf]

- Definición

VoWiFi es un término utilizado para tecnologías o servicios que proporcionan voz (telefonía móvil) a través de la red WiFi, en lugar de la red telefonía celular. El concepto y el servicio se introdujeron hace varios años, sin embargo, solo hasta hace poco comenzó a tomar fuerza como resultado de la creciente posibilidad de roaming entre WiFi y redes móviles [232404 development]. El servicio de VoWiFi se da gracias a lo que técnicamente se conoce como WiFi Calling, proporcionado por los operadores y que viene integrado en muchos de los dispositivos actuales, cabe mencionar que WiFi Calling no es una aplicación como Skipe o WhatsApp sino que es una función que se habilita para realizar y recibir llamadas a través de WiFi. [2018rodrigues]

Los esfuerzos entre la industria y los operadores para proporcionar VoWiFi no paran, es común ver en los puntos de acceso y en los dispositivos inteligentes con WiFi, la función que permite WiFi Calling y todo esto a su vez, admitido por los proveedores de servicios de telecomunicaciones, además, gran parte de los equipos tienen puertas de enlace de modo dual, que permiten la intinerancia netre las redes WiFi y celulares [2324developmet]

- Esquema de red general

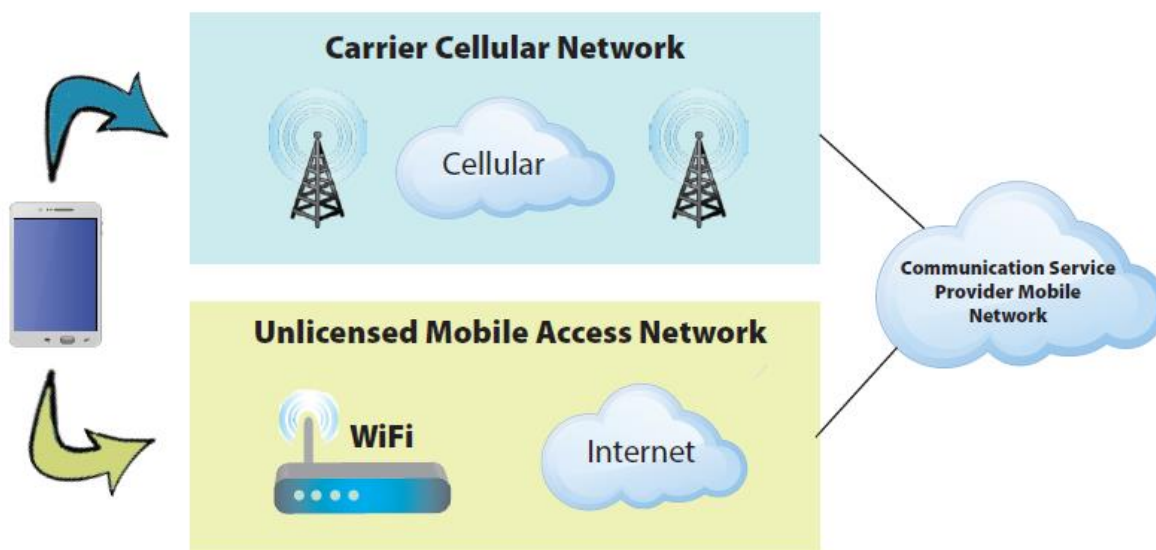


Figura 1.122 – Esquema básico de red VoWiFi

Como se puede observar en la Figura 1.12, para las comunicaciones VoWiFi es clave el servicio modo dual de los dispositivos móviles, por ejemplo, los teléfonos con GSM (Global System for Mobile) o CDMA (Acceso Múltiple por División de Código) usan la señal WiFi cuando estén conectados a un punto de acceso o usarán el canal de telefonía en ausencia de una señal WiFi. [VoWiFi Oportunity]

- **Características [wpwifi calling][[epdf] [VoWiFi Oportunity]**

- Se prioriza el tráfico de voz.
- Entrega de voz ininterrumpida.
- Mejora la cobertura en zonas indoor donde la red celular no llega.
- Disponibilidad en hogares, oficinas y espacios públicos.
- Ahorro de costos, minutos de llamada a menor precio.
- Soporte para múltiples dispositivos.

1.2.3. RoF

Los sistemas de comunicación por fibra óptica se han instaurado hace ya varias décadas, permitiendo conexiones transoceánicas, de larga distancia y en redes regionales y metropolitanas. En la actualidad, la demanda de ancho de banda, el despliegue de servicios como VoIP, HDTV, entre otros; han impulsado el uso de la fibra óptica hasta el usuario final, esto significa un aumento en el tendido de fibra FFTH, perfilando esta tecnología como una gran opción para el segmento de red fijo [sistemas convergentes]. Simultáneamente, los sistemas de comunicación inalámbricos se han convertido en un pilar indispensable para las conexiones y el acceso directo a los servicios tales como telefonía móvil, Internet inalámbrico, sistemas inalámbricos fijos y móviles, entre otros.

La evolución de las comunicaciones inalámbricas tiene una implicación directa con el aumento exponencial del tráfico de datos que los canales de transmisión inalámbricos necesitan transportar con una latencia cada vez más pequeña. Esto se debe a que los dispositivos inalámbricos inteligentes, como teléfonos, computadoras portátiles y tabletas, están equipados con varias aplicaciones multimedia intensivas en datos, como video vigilancia inalámbrica, TV móvil, transmisión en vivo de video HD, juegos en línea, redes sociales y almacenamiento en la nube. Estudios recientes predicen que habrá un aumento de varios cientos de veces en el volumen de tráfico de datos en los próximos años junto con un amplio crecimiento de la cantidad de dispositivos conectados [CISCO][OWC]. El factor clave para el éxito de las redes de próxima generación será alcanzar la capacidad para soportar un crecimiento tan exponencial del tráfico de datos con diversos requisitos de QoS [OWC].

Para suplir los requisitos de ancho de banda y alta demanda conectividad de los usuarios, se ha llevado al límite la capacidad de las redes inalámbricas existentes y sin embargo parecen quedarse cortas, pero tampoco los sistemas de comunicación ópticos pese a su gran ancho de banda permiten el acceso y movilidad que se requiere para las redes actuales, ante esto, se presenta como una gran solución realizar la unificación de redes ópticas e inalámbricas que combinadas, permiten una mejora en la prestación de los servicios, optimización de recursos, mayor número de usuarios, gran despliegue y un costo accesible. [PatiñoCarrillo]

- Definición

RoF es una combinación de redes inalámbricas con redes de fibra óptica, donde las señales de RF se distribuyen desde una ubicación central CO (Central Office, Oficina Central) a través de un enlace de fibra óptica hasta una estación base BS (Base Station, Estacion Base), éstas BS transmiten datos a estaciones o terminales móviles que se encuentran dentro del alcance [Performance] [6-8]. El concepto de RoF significa que la transmisión de información en la fibra óptica se realiza mediante el ajustamiento de la luz con la señal de RF [performance]. Los sistemas RoF permiten aprovechar la baja atenuación y el alto ancho de banda de un enlace óptico con la transmisión de señales de radiofrecuencia, microondas u ondas milimétricas, pero existen diferentes consideraciones, ventajas y desventajas al emplear determinado tamaño de longitud de onda, sin embargo, a nivel general representan una posible solución para aumentar la capacidad, la movilidad y reducir los costos en la red de acceso [Performance].

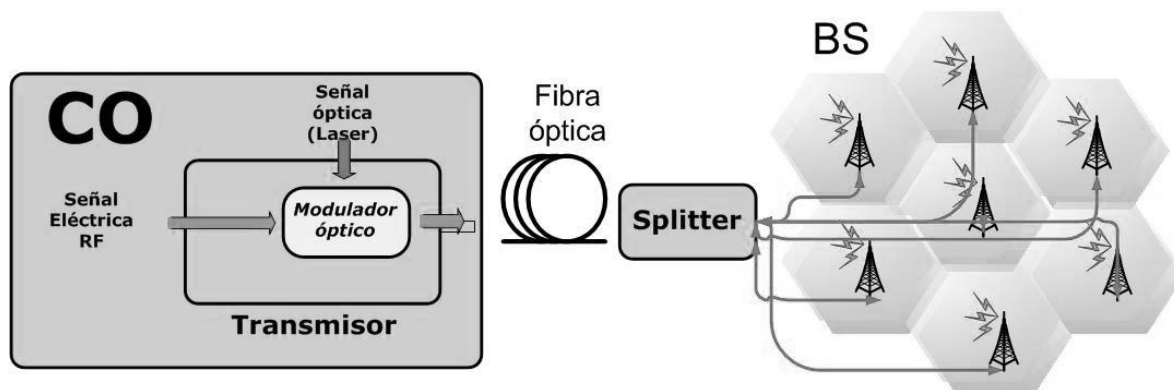


Figura X: sistema general RoF.

Cuando existen diferentes BS, la señal es dividida a cada una a través de un dispositivo pasivo que se conoce como splitter.

Desde los primeros experimentos de transmisión y distribución de señales de radio sobre fibra óptica, la convergencia de redes ópticas e inalámbricas ha evolucionado [8][10](emergentes), se han utilizado en diversidad de redes inalámbricas como redes celulares exteriores y antenas distribuidas en interiores [emergentes]. De esta manera los sistemas RoF enfrentan retos para soportar múltiples estándares, respaldar de manera confiable y rentable las demandas de capacidad, el crecimiento del tráfico y los servicios en las redes actuales y futuras. [emergentes]. Recientemente se está explorando la región de frecuencias que permita extender la cobertura inalámbrica de los sistemas de radiocomunicaciones para la prestación de servicios de banda ancha, el gran interés se ha centrado en las ondas milimétricas MMW, especialmente en la banda de 60GHz sin licencia y disponible a nivel mundial, pues los estándares inalámbricos existentes como LTE (), UMTS (), GSM (), IEEE 802.11x, trabajan en rangos de baja frecuencia desde los 700MHz hasta 6GHz [11,12].

La región de frecuencia de MMW (60GHz) ofrece a los operadores inalámbricos alcanzar velocidades de datos de varios Gb/s, lo cual puede compensar las demandas crecientes de capacidad. Sin embargo, los sistemas inalámbricos presentan inherentemente características de pérdidas y atenuaciones por propagación que se hacen más notorios a frecuencias altas y limitan la distancia de cobertura, lo que conduce a arquitecturas de red que presenten tamaños de celdas más pequeñas (picoceldas). Integrando estos sistemas con una red de distribución de fibra óptica, se consigue la entrega eficiente de las señales inalámbricas de alta velocidad de datos a un gran número de puntos de acceso y se optimiza la cobertura de radio. [13 emergentes]

- Esquemas de transporte de la señal RoF

La señales de RoF pueden ser transportadas a través de enlaces bien sea analógicos o digitales, cada técnica tiene sus ventajas y desventajas [14]. A continuación se muestra los dos enfoques para implementar un enlace remoto con fibra óptica y antenas que permitan la transmisión de señales RF en una arquitectura de red convergente óptica e inalámbrica. [15]

Esquemas de transporte analógicos

Como se observa en la figura X, los enlaces de fibra óptica entre una CO y la unidad de antena o BS ubicada remotamente se realizan como enlaces de fibra óptica analógicos. En el enlace descendente (de CO a BS) la señal se convierte a través de un conversor DAC (Digital to Analog Converter), luego se modulan en una señal portadora de RF con una frecuencia f_c que corresponde a la frecuencia inalámbrica, en seguida es modulada en una portadora óptica a través de un proceso de conversión de eléctrico a óptico E-O (electrical to optical), en la antena remota BS, la señal óptica modulada se fotodetecta, es decir, se convierte de óptica a eléctrica E-O (Electrical to optical) se filtra a través de un filtro pasa banda BPF (Band-Pass Filter), se amplifica y se dirige a la antena para la transmisión inalámbrica. Para el enlace ascendente se lleva un proceso similar pero inverso, con la red inalámbrica que transporta la señal desde la BS hacia la CO. []

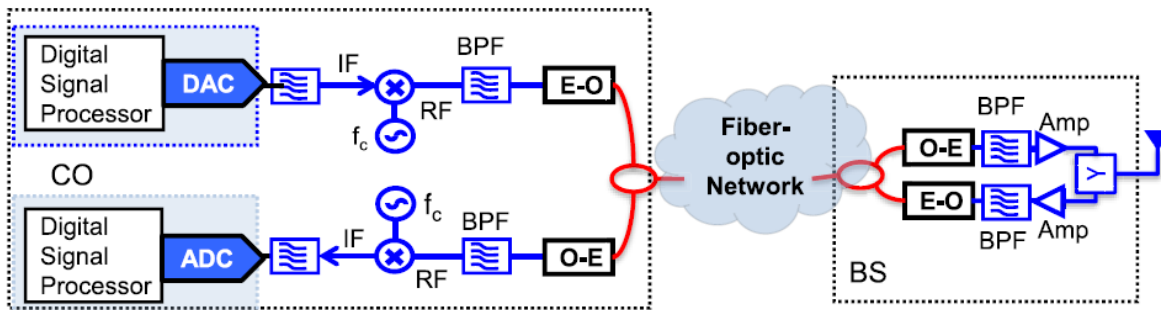


Figura X. Transporte de señal RoF entre CS y BS, enlace analógico

Esquemas de transporte digital

En esta configuración de enlace de fibra óptica de RF digitalizada, para el enlace ascendente (de BS a CO) el primer paso es digitalizar la señal del operador inalámbrico en la BS antes del transporte a través del enlace óptico, esta digitalización de la señal RF genera una señal muestreada en forma de serie que puede ser modulada directamente por un láser semiconductor, transmitirse a través del enlace de fibra óptica y posteriormente detectarse como cualquier otra información digital, en la figura X se ilustran los componentes del esquema.

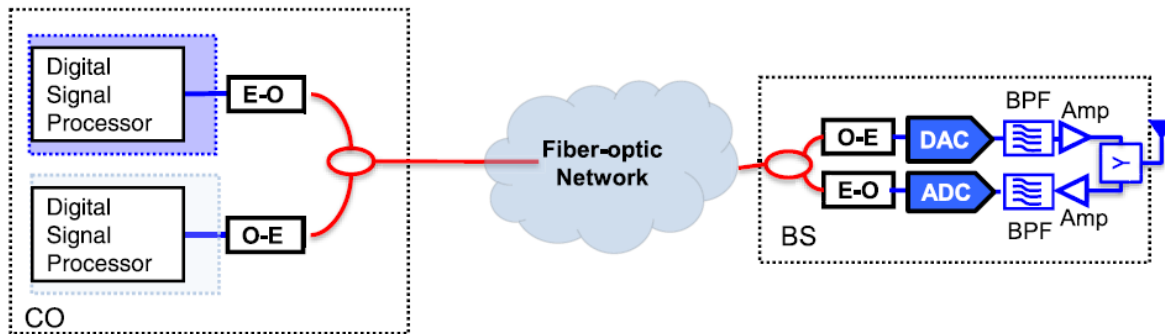


Figura X. Transporte de señal RoF entre CS y BS, enlace digital.

- Generación de la señal RoF

Para la transmisión de las señales RoF existen diferentes principios a través de los cuales se genera la señal RF adecuada al canal óptico para su posterior detección y recepción.

- Modulación:

Este proceso se genera a partir de la modulación eléctrica y la óptica. La señal eléctrica se modula en frecuencia, amplitud o fase de acuerdo a las especificaciones requeridas por el estándar de red inalámbrico con el que se esté trabajando [toward]. Ésta señal modula a la portadora óptica que se transmite a través de la fibra. Dicha alteración de las señales se da gracias a un diodo láser que modula la intensidad de la luz de acuerdo con la señal eléctrica. [67] de patillo].

Existen diferentes tecnologías de modulación óptica, sin embargo sobresalen dos grandes grupos como lo son la modulación directa y la modulación indirecta.

- Modulación directa: la señal de información altera la corriente de conducción del láser directamente y genera una modulación de intensidad IM (Intensity Modulation) en la fuente óptica, de forma similar se logra la demodulación, mediante la detección directa DD como se aprecia en la figura X[toward, 11].

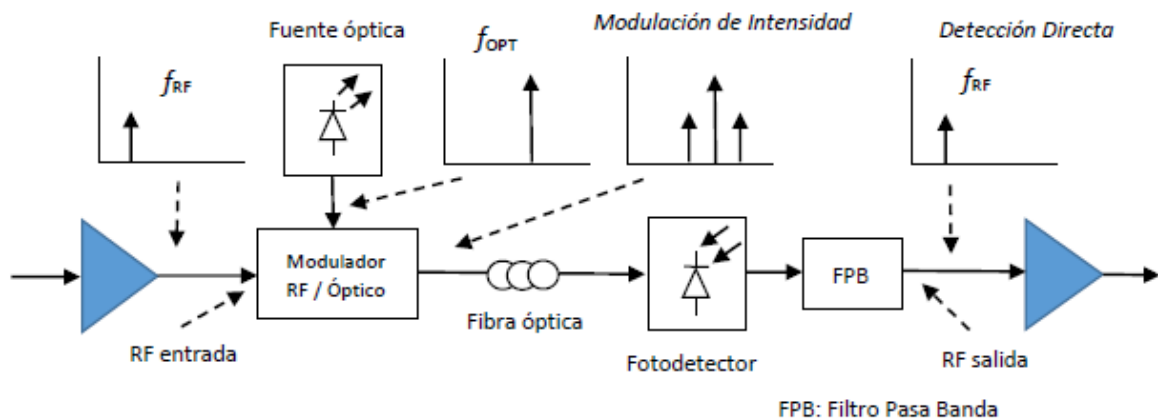


Figura X: Modulación IM/DD [68] patiño

- Modulación externa: Se usa para la modulación en frecuencias más altas a los 10GHz, donde la modulación directa presenta limitaciones. En este caso, se tiene un dispositivo óptico externo al que se le hace llegar la señal moduladora, a través de este dispositivo se hace pasar la señal óptica con una intensidad constante en el tiempo generada por el láser, como resultado a la salida se tiene la radiación modulada y adecuada al canal[67] patiño. Se tienen dos tipos de moduladores más usados como lo son el electroóptico MZM y el de electroabsorción EAM

MZM: en estos, se genera un cambio en el índice de refracción del material originado por una señal eléctrica. Un cristal electrooptico orientado correctamente puede modular la fase y la intensidad de la señal óptica si se aplica una tensión en la dirección correcta. En los MZM se modula variando la fase de la señal óptica que circula por dos guías de onda. [66] patiño.

EAM: se basan en la absorción de la luz cuando ésta pasa a través de un semiconductor y éste se encuentra bajo los efectos de un campo eléctrico. De acuerdo a una tensión determinada se hace conmutar el modulador de un estado "on" a "off".

- Heterodinación óptica: en este método la fuente de luz genera varias señales ópticas, una de éstas es modulada por la señal que porta la información, en seguida son mezcladas o heterodinadas por un fotodetector o por un mezclador externo para formar la señal RF de salida [11]toward [75]patiño.

- Comparación hacia arriba y hacia abajo: en esta técnica, no se transporta la señal de banda RF a través de fibra óptica, en su lugar se envía la señal de banda IF (Frecuencia Intermedia) ya que esta señal óptica de banda IF presenta muy pocos efectos de dispersión.[68] patiño

- transceptor óptico: es posible implementar la estructura de una BS de manera sencilla con un transceptor como el EAM, y sirven como un conversor óptico-eléctrico en el enlace descendente y conversor eléctrico-óptico para el ascendente al mismo tiempo. Esto se logra transmitiendo dos longitudes de onda desde la CO hacia la BS, una va modulada con los datos enviados en el enlace descendente mientras que la no modulada viaja y se modula en la BS con los datos de enlace ascendente y retoma a la CO, es decir, el transceptor actúa como fotodiodo para la ruta d datos y también como modulador ofreciendo una ruta de retorno para los datos, de esta manera se evita instalar un láser en el sitio remoto. [75][85] Patiño

1.3. ESQUEMAS DE MODULACIÓN DIGITAL EN SISTEMAS ÓPTICOS

La transmisión de información digital busca comunicar entre sí distintos sistemas informáticos, con la ventaja de manejar grandes volúmenes de información e incrementar significativamente la velocidad de datos, para ello, la señal digital es transmitida de dos formas distintas: una transmisión en banda base en la que la señal va directamente por el canal sin una modulación previa y una transmisión digital en banda ancha, en la que la señal de información digital se modula previamente con alguna técnica de modulación digital [35]. Por otra parte, la modulación en teoría de comunicaciones refiere una variación de los parámetros de una onda portadora con respecto al voltaje instantáneo de una onda mensaje; cuando se tiene una onda mensaje digital, el o los parámetros alterados (amplitud, frecuencia o fase de la portadora) tienen tantos valores como niveles de voltaje tenga el mensaje [36].

Con el avance tecnológico, aparecen distintas técnicas de modulación digital en la que una señal analógica de salida irá variando su amplitud, frecuencia y fase, o conjuntamente amplitud y fase, de acuerdo con una señal digital de información en la entrada; el esquema de multiplexación OFDM utiliza los esquemas de modulación M-PSK (*M-ary Phase-Shift Keying*, *Modulación de Desplazamiento de Fase M-aria*) y M-QAM [37], por tanto, es pertinente una revisión teórica que empalma a estos dos tipos de modulación digital, como sigue.

1.3.1. Modulación PSK

Es un esquema de modulación angular que se caracteriza por variar la fase de la onda portadora entre un número “n” de valores discretos posibles, dependiendo de un número de estados limitados que presenta la señal moduladora; Este esquema es de uso común en los módems y permite mejor aprovechamiento del ancho de banda con respecto a predecesoras como ASK (*Amplitude Shift Keying*, *Modulación de Desplazamiento de Amplitud*) y FSK (*Frequency Shift Keying*, *Modulación de Desplazamiento de Fase*) [38]. La ecuación 1.1 representa la expresión analítica general para PSK.

$$S_i(t) = \sqrt{\frac{2E}{T}} \cos[\omega_o t + \phi_i(t)] \quad \begin{array}{l} i = 1, 2, \dots, M \\ 0 \leq t \leq T \end{array}$$

Ecuación 1.1 – Expresión general para PSK

En donde E es la energía de símbolo, T la duración del símbolo y $\phi_i(t)$ es el término de fase que contiene M valores discretos. PSK utiliza un número de fases finitas para cualquier cambio del patrón digital a la entrada, así, si se trabaja con 4

fases diferentes a intervalos de $\pi/2$, se pueden codificar 2 bits por cambio de fase, como se muestra en la tabla 1.3.

ESTADOS	FORMA DE ONDA PSK
00	$A * \cos(2\pi f_c t + 5\pi/4)$
01	$A * \cos(2\pi f_c t + 7\pi/4)$
10	$A * \cos(2\pi f_c t + 3\pi/4)$
11	$A * \cos(2\pi f_c t + \pi/4)$

Tabla 1.3 – cambios de fase en PSK

- BPSK

Se define como una modulación de onda cuadrada con portadora suprimida, la cual se utiliza para aplicaciones que no requieran altas velocidades de transmisión y de bajo costo, esta variante de PSK posee una sola frecuencia y dos fases de salida, las cuales son el 1 y 0 lógico, respectivamente; cuando la señal moduladora cambia de estado, la fase de la portadora de salida varía entre dos ángulos que están 180° desfasados [39].

- QPSK

El esquema de modulación QPSK (*Quadrature Phase-Shift Keying, Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura*), posee $M = 4$ posibles fases de salida diferentes, por tanto, los datos de entrada de la onda moduladora se agrupan en series de 2 bits, con la misma amplitud y separación angular de $\pi/2$; se utiliza en la transmisión de datos por satélite ya que presenta gran inmunidad al ruido y alta seguridad en la información [40]. En la figura 1.12 se observa el diagrama de constelación² para QPSK, así mismo, en la tabla 1.3, la forma de onda definida a la salida para los cuatro posibles estados.

² Los esquemas de modulación digital se representan mejor dentro de un diagrama de “constelación”, definido como una representación geométrica de señales dentro de un área de dimensiones finitas, donde se asignan los posibles estados, o puntos de amplitud y fase usados por cada símbolo [46].

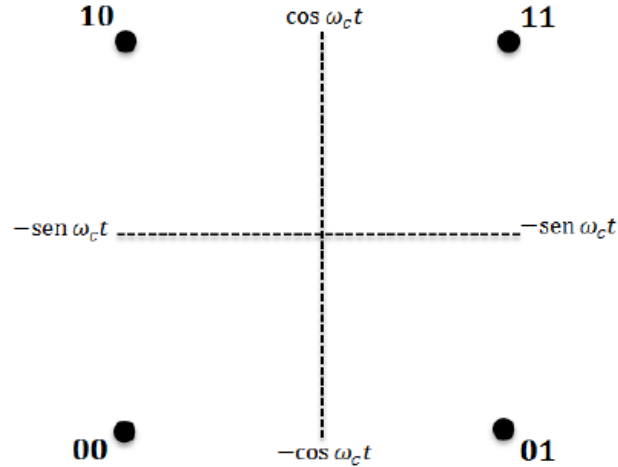


Figura 1.13 – Diagrama de constelación para QPSK

1.3.2. Modulación QAM

Llamada también APK (*Amplitude-phase keying, Modulación de Amplitud-Fase*) define que la señal de información está contenida tanto en amplitud como en la fase de la portadora [35]. La técnica transmite dos mensajes independientes a partir de una misma portadora, los mensajes ocupan la misma banda de frecuencia pero se encuentran desfasados 90° grados entre sí; cada mensaje es modulado independientemente y transmitido por un único camino sobre la misma banda de frecuencia, posteriormente separado por demodulación en el receptor. Por lo anterior, la señal QAM resultante es la suma lineal de dos señales independientes, que han sido moduladas en DSB-SC (*Double-SideBand Suppressed-Carrier transmission, Transmisión de Portadora Suprimida de Doble Banda Lateral*) [41]. La figura 1.13 representa una modulación QAM.

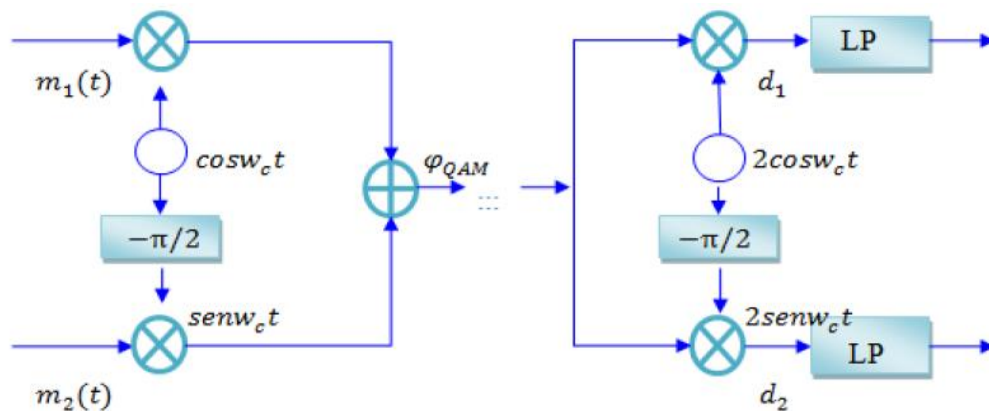


Figura 1.14 – Esquema en bloques de QAM.

En la figura 1.12 se presenta un modulador QAM, el cual descompone un flujo de bits de entrada en los mensajes $x(t)$ y $y(t)$; $x(t)$ modula una portadora con una frecuencia angular W_c y $y(t)$ modula una portadora de la misma frecuencia angular, pero desfasada 90° grados, la anterior definición se conoce como una componente en fase (I) y una componente en cuadratura (Q). Antes de obtener la señal modulada, las señales son pasadas por un filtro SRRC (*Square-Root Raised Cosine Signals, Señales de Coseno Elevado de Raíz Cuadrada*), el cual busca reducir la ISI (*Inter Symbol Interference, Interferencia Entre Símbolos*) en el sistema [38]. La señal QAM resultante es la suma lineal de las dos señales de entrada independientes $x(t)$ y $y(t)$, tal y como se expresa mediante la ecuación 1.2.

$$\delta(t) = x(t)\cos(W_c t) + y(t)\sin(W_c t)$$

Ecuación 1.2 – Ecuación QAM

La señal resultante tiene dos bandas laterales y las dos señales en banda base están contenidas en cada banda lateral, en el receptor se pueden recuperar las dos señales en banda base mediante un detector o modulador síncrono. Las señales d_1 y d_2 son filtradas para eliminar los múltiplos de los armónicos de la señal del oscilador local y finalmente se suman linealmente; en la realidad la sincronización es clave para el proceso de demodulación de la señal QAM, por lo que se necesita de una referencia de fase para compensar las variaciones de fase y frecuencia introducidas en el canal, trabajo que realiza el lazo PLL (*Phase-Locked Loop, Lazo de seguimiento de Fase*) [38].

Este esquema de modulación es ampliamente utilizado en el ámbito de las comunicaciones modernas, para aplicaciones que necesitan gran velocidad de transmisión de datos, tanto en medios físicos como inalámbricos, por ejemplo, sistemas de transmisión de televisión, microondas, y satélites, ya que permite mejorar la eficiencia espectral en el ancho de banda disponible [42]. Los formatos QAM se acercan más al límite de capacidad de Shannon cuando se busca una alta eficiencia espectral, sin embargo, se necesita de un módem más complejo, aunque en la práctica, QAM supera las ventajas de rendimiento en comparación con su complejidad y por tanto es más utilizada que los formatos PSK.

1.3.3. Constelaciones M-QAM

En la técnica de señalización M-aria, dos o “k” bits entrantes de información son agrupados dentro de un símbolo y durante cada periodo de símbolo es transmitido uno de los M posibles símbolos de salida, para un total de $M = 2^K$ símbolos diferentes, donde K es un entero [43]. Así, para 8-QAM entonces $M = 8$ y $K = 3$, con lo cual se tienen 4 bits por símbolo a una velocidad de transmisión de datos de 1/3 de la tasa de transmisión. En la figura 1.14 se observan algunos ejemplos de constelaciones M-QAM.

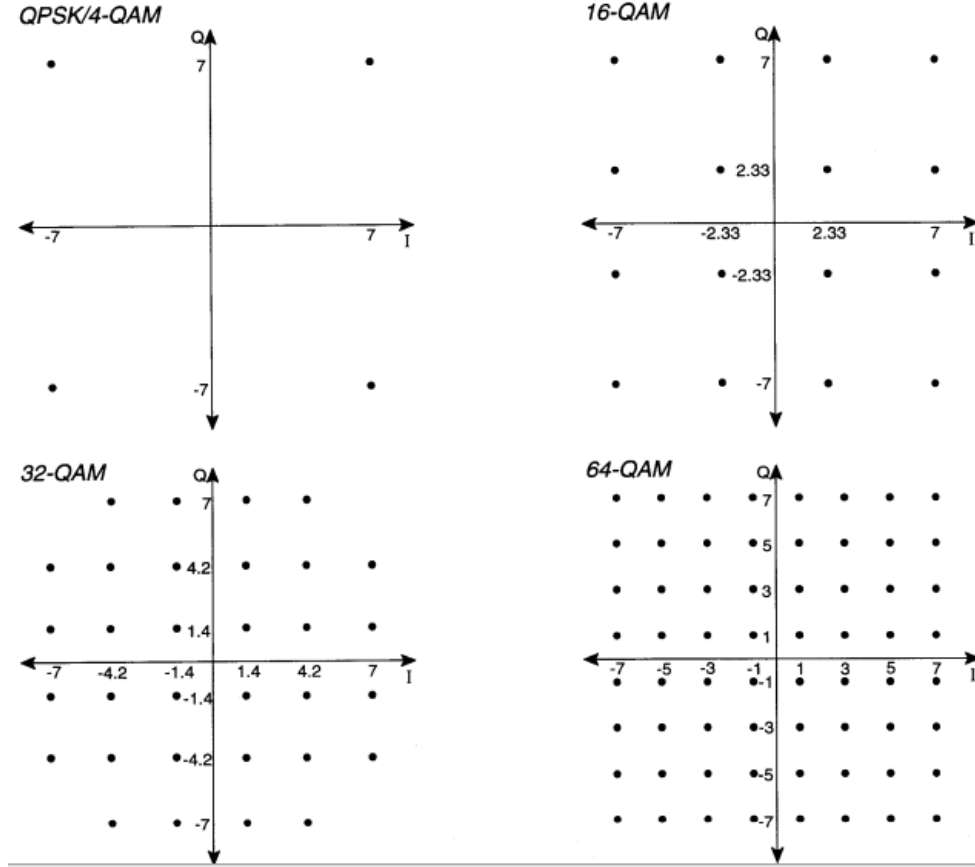


Figura 1.15 – Algunas constelaciones M-QAM

La forma general de la señal M-aria se define de acuerdo con la ecuación 1.3.

$$S_i(t) = \sqrt{\frac{2 * E_{\min}}{T_s}} * a_i \cos(2\pi f_o t) + \sqrt{\frac{2E_{\min}}{T_s}} * b_i \sin(2\pi f_o t)$$

$$0 \leq t \leq T_s \quad i = 1, 2, \dots, M$$

Ecuación 1.3 – Señal M-aria

Donde E_{\min} es la energía de la señal cuando la amplitud es mínima, a_i y b_i son enteros independientes elegidos de acuerdo con la ubicación de un punto de señal particular dentro de la constelación; f_o es la frecuencia de la portadora y T_s es el periodo de símbolo.

- Rotación de la constelación

Esta técnica también conocida como SSP (*Signal Space Diversity, Diversidad del espacio de señales*) se utiliza en modulaciones digitales como QAM, con el propósito de aumentar el nivel de diversidad, esto es, agregar redundancia en los símbolos dentro de la constelación con el fin de mejorar el desempeño en el receptor dentro de escenarios de propagación difíciles. En el receptor ocurre el proceso de demodulación para determinar la señal de información transmitida, el anterior necesita de las componentes I y Q de un punto o símbolo dentro de la constelación, es decir, no es posible la estimación de la componente I a partir de la componente Q – no existe correlación –, así, con la utilización de la técnica mencionada, cada componente I o Q es transmitida con bastante información como para determinar el símbolo transmitido [44]. La apariencia de una constelación rotada 64-QAM es tal y como se muestra en la figura 1.15.

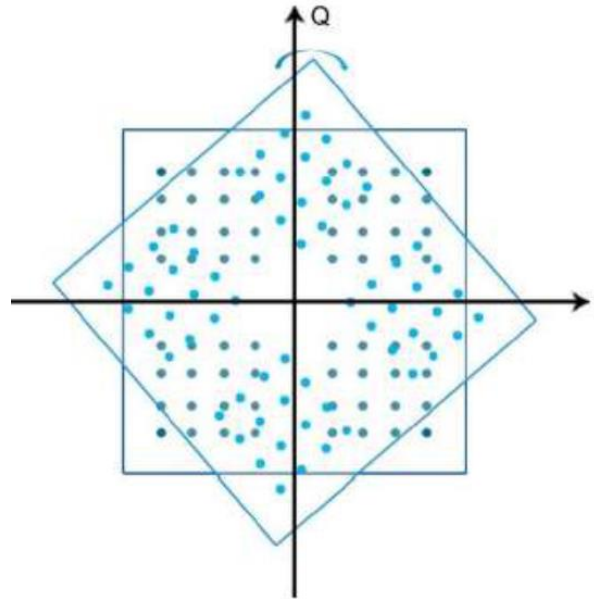


Figura 1.16 – Constelación 64-QAM rotada

1.3.4. Consideraciones importantes QAM

- El ancho de banda mínimo para transmitir una señal QAM, denotado como B_{QAM} , es dos veces el ancho de banda ocupado por la señal de información digital, denotado como B_I [35], tal y como se expresa mediante la ecuación 1.4:

$$B_{QAM} = 2 * B_I$$

Ecuación 1.4 - Relación de ancho de banda

- De acuerdo con la figura 1.9, entre más alto orden de modulación es posible poner a la salida mayor cantidad de bits por símbolo, sin embargo, debido a la proximidad de los puntos dentro de la constelación, se presenta mayor ruido y distorsión, por tanto una mayor BER (*Bit Error Rate, Tasa de Error de Bit*), lo cual requiere un nivel más alto de potencia transmitida [43]. Las formas más comunes de modulación M-QAM son 16-QAM, 64-QAM y 256-QAM, estos se pueden aplicar en comunicaciones ópticas, alámbricas e inalámbricas, para servicios como televisión digital por cable, aplicaciones de dispositivos de red, televisión digital terrestre, y demás [45].
- Los sistemas QAM preferiblemente utilizan el Código Gray, también llamado código de distancia mínima, ya que disminuye el número de bits erróneos en la transmisión.

1.4. ESQUEMAS DE MULTIPLEXACIÓN EN SISTEMAS ÓPTICOS

Las comunicaciones ópticas han tomado gran valor en las últimas dos décadas gracias a su gran ancho de banda y transmisión de información a grandes distancias; por otra parte, cada día aparecen nuevas aplicaciones y servicios que requieren mayor capacidad de transmisión de datos, por tanto, la capacidad de las redes ópticas busca satisfacer la demanda futura de datos y aprovechar al máximo el ancho de banda que posee la fibra óptica [46]. Para la gestión del ancho de banda se han desarrollado los ecualizadores adaptativos y técnicas de modulación avanzadas, como OFDM y WDM.

1.4.1. Generalidades de WDM

La multiplexación por división de longitudes de onda WDM permite multiplicar la capacidad de transmisión de una fibra óptica, por ejemplo, para una fibra óptica con una capacidad de 2 Gbps, se busca que utilizando 10 canales WDM, la misma fibra óptica obtenga una capacidad de 20 Gbps. En la figura 1.16 se observa un sistema de comunicaciones óptico utilizando el formato WDM.

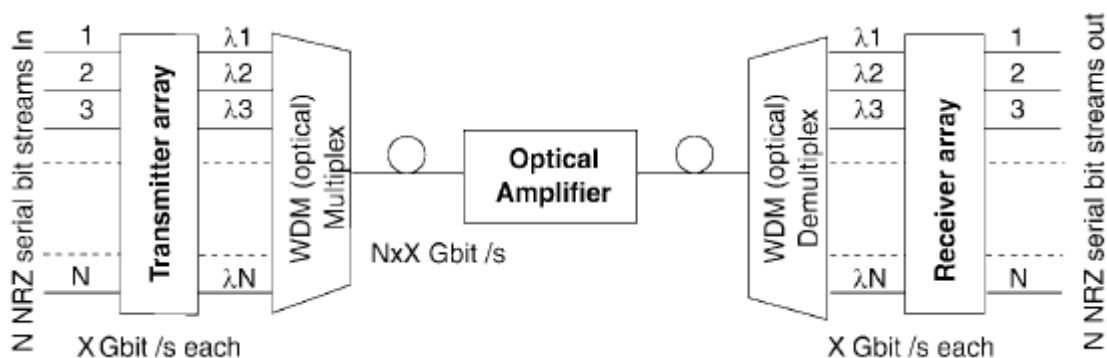


Figura 1.17 – Sistema general de los formatos WDM

Se observa que cada portadora posee una λ distinta para posteriormente hacer uso de un multiplexor en la entrada del sistema, que se encarga de combinar las diferentes portadoras dentro del mismo hilo de fibra óptica. Es importante hacer un uso óptimo del ancho de banda en las comunicaciones ópticas, por tanto se implementan nuevas actualizaciones al formato original, conocidos como CWDM (Coarse wavelength Division Multiplexing, Multiplexación por División de Longitud de onda Gruesa) y posteriormente DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing, Multiplexación por División de Longitud de Onda Densa) capaces de transmitir información en una amplia gama de longitudes de onda a diferentes velocidades y a grandes distancias [47].

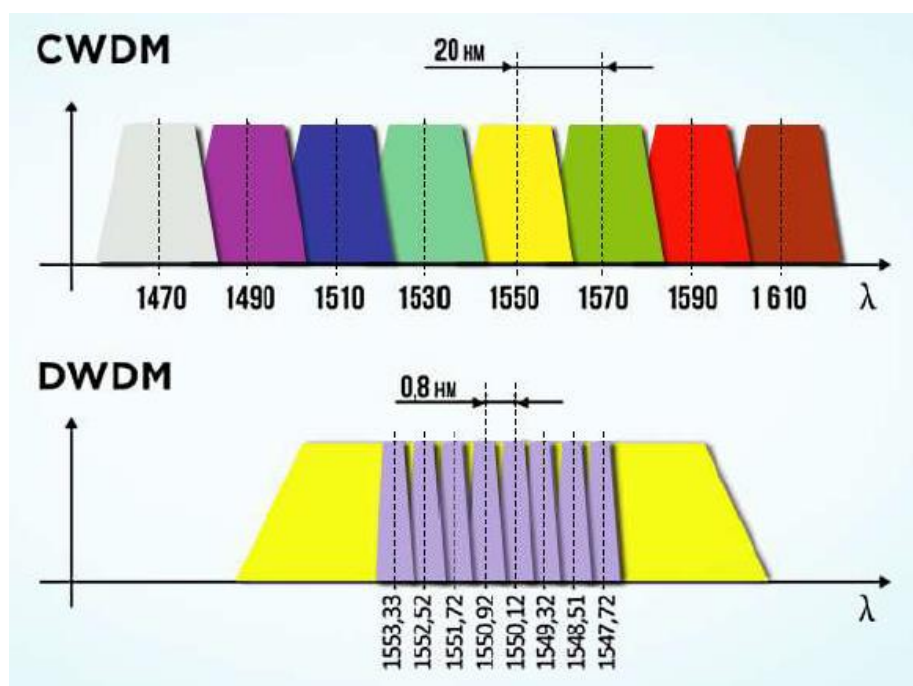


Figura 1.18 – Comparación CWDM y DWDM

1.4.2. Fundamentos de OFDM

El formato OFDM es un tipo de modulación digital MCM (*Multi-carrier modulation, Modulación Multiportadora*) con características de modulación y multiplexación, ya que divide la señal en un conjunto de señales y la modula a una nueva frecuencia utilizando los formatos QAM o PSK [48]. Estas señales se envían sobre un conjunto de subcanales con ancho de banda reducido, cada uno centrado en una portadora, debidamente espaciadas y ortogonales entre sí. Como consecuencia de transmitir los datos modulados en paralelo se tiene una duración extensa del periodo, por tanto la interferencia dentro del canal solo afecta una porción de señal y se puede eliminar utilizando un intervalo de guarda llamado

prefijo cíclico [36]. El uso de la FFT (*Fast Fourier Transform, Transformación Rápida de Fourier*) caracteriza a la tecnología OFDM, ya que permite la transmisión en paralelo de subportadoras ortogonales, evitando así las interferencias dentro del canal.

La propiedad de ortogonalidad³ busca concentrar las señales subportadoras, permitiendo la eliminación de bandas de guarda entre las mismas y que múltiples señales sean transmitidas sobre un canal común, así, se utiliza menos ancho de banda espectral en comparación con la tecnología WDM. En OFDM, el flujo de bits a la entrada se modula en formatos QAM o PSK, cada una de estas subseñales resultantes modula una a una las N portadoras ortogonales entre sí; la idea básica de la modulación multiportadora es que un determinado ancho de banda W sea dividido en un conjunto de N subcanales centrados en una subportadora con ancho de banda $F_c = W/N$ [41]. En la figura 1.18 se observan los conceptos de uniportadora y multiportadora, así mismo, en la figura 1.19 se presenta un sistema de comunicaciones utilizando la tecnología OFDM.

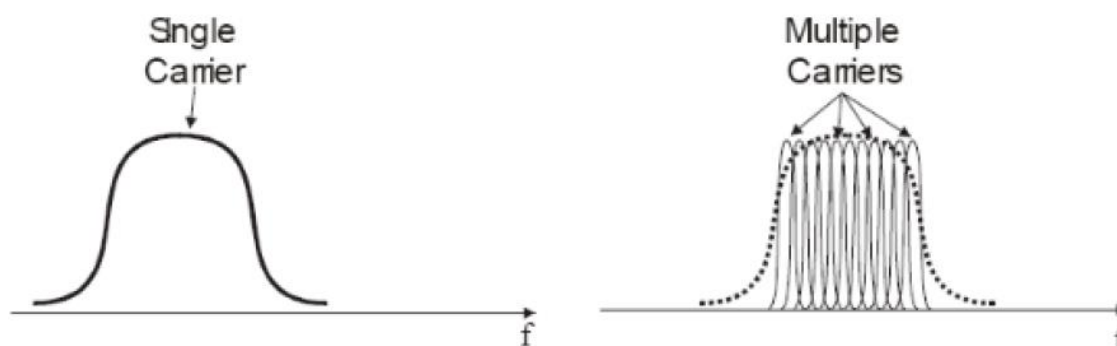


Figura 1.19 – Comparación de transmisión uniportadora a multiportadora

³ Dos funciones son ortogonales si la integrada de la multiplicación de las señales durante el mismo periodo de símbolo es cero.

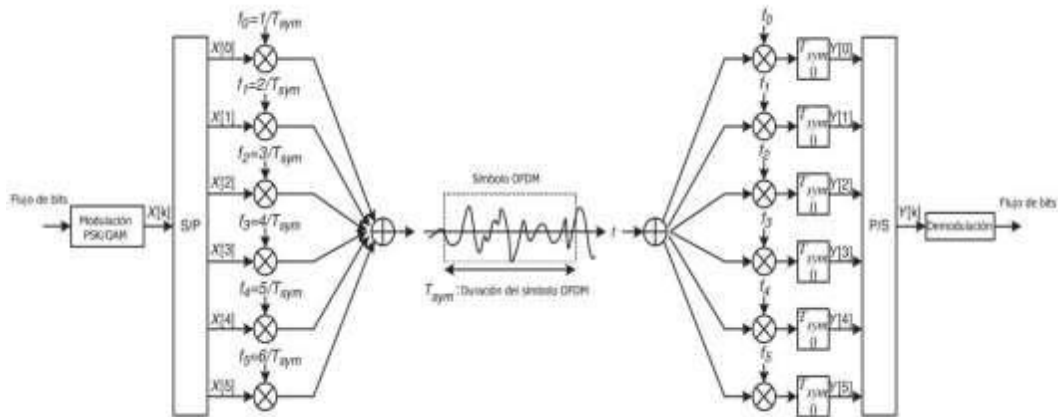


Figura 1.20 – Sistema de comunicaciones utilizando OFDM

- Ventajas y desventajas de OFDM [49]

Las ventajas de la tecnología OFDM han permitido que se implemente en el contexto de las telecomunicaciones digitales de banda ancha, tanto para redes ópticas, alámbricas o inalámbricas, algunas de las ventajas son las descritas a continuación.

- Eficiente contra la ISI (*Intersymbol Interference*, *Interferencia entre Símbolos*) y desvanecimientos causados por la propagación multitrayecto.
- Alta eficiencia espectral.
- Implementación eficiente de la FFT e IFFT (*Inverse Fast Fourier Transform*, *Transformación Rápida Inversa de Fourier*).
- Eficiente contra la interferencia cocanal de banda estrecha.
- Se adapta a las condiciones hostiles del canal sin ecualización compleja.
- Altas velocidades de transmisión de datos.
- Permite la introducción de anchos de banda dinámicos para las nuevas redes EON (*Elastic Optical Network*, *Red Óptica Elástica*).

Por otra parte, la ventaja más significativa de OFDM es su complejidad en relación con las modulaciones de una sola portadora, algunas desventajas de la tecnología OFDM son:

- Perceptivo frente a los efectos doppler.
- Perceptivo frente a los problemas de sincronización en frecuencia.
- Alto PAPR (*Peak-to-Average-Power Ratio*, *Potencia Pico a Potencia Promedio*).
- Sensibilidad al ruido de fase.

1.4.3. OFDM óptico

En [49] se dice que el avance hecho en el procesamiento digital de señales ha permitido la introducción del esquema de modulación OFDM en las comunicaciones ópticas desde el año 2005; la transmisión de información en las redes ópticas mediante una sola portadora sugiere un uso ineficiente del espectro, sin embargo, la demanda de mayor velocidad de transmisión de datos con un gran ancho de banda requiere una búsqueda de soluciones como, más tendidos de fibra óptica – no tan eficiente – o la optimización del ancho de banda óptico, así, OFDM es una solución prometedora.

La señal OFDM utilizada en comunicaciones inalámbricas de RF (*Radio Frequency, Radio Frecuencia*) no puede ser utilizada en las comunicaciones ópticas, ya que la señal OFDM es compleja y bipolar, mientras que los formatos O-OFDM (*Optical OFDM, OFDM Óptico*) utilizan modulación en intensidad – la información se transmite con la variación de la potencia óptica – que requiere que los símbolos sean unipolares y reales; hay varias soluciones que han sido desarrolladas para obtener una señal positiva, como: DC-biased O-OFDM, ACO-OFDM (*asymmetrically clipped O-OFDM, O-OFDM recortado asimétricamente*) y Flipped-OFDM (*OFDM volteado*), sin embargo, la eficiencia de potencia de O-OFDM se reduce con la utilización de señales unipolares [50]. Existen dos subdivisiones para OFDM óptico de acuerdo con la técnica utilizada para la detección en el receptor, con sus respectivas ventajas y desventajas al utilizarlas en escenarios de comunicaciones ópticas, como sigue.

- IM/DD-OOFDM

El diagrama de bloques para un sistema de comunicaciones que implementa la tecnología IM/DD-OOFDM (*Intensity Modulation/Direct Detection - Optical OFDM, Modulación de Intensidad/Detección Directa – OFDM Óptico*) es mostrado como en la figura 1.17.



Figura 1.21 – Diagrama de bloques para IM/DD-OOFDM

Con la demanda de redes ópticas robustas y rentables a cortas distancias (menores a 100 km) en donde no se requiera una amplificación óptica, los sistemas IM/DD son fuertes candidatos a ofrecer esta solución gracias a su flexibilidad, confiabilidad, manipulación e instalación sencilla y su bajo costo. Su funcionamiento precisa una conversión eléctrica óptica mediante un láser modulado y un

fotodetector en el receptor que detecta las variaciones de potencia óptica del pulso y la transforma en corriente eléctrica [49].

En la figura 1.20, el transmisor OFDM produce una señal eléctrica OFDM que se modula en intensidad para pasarla al dominio óptico, la señal óptica resultante se transmite por la fibra óptica y si se requiere, un transmisor óptico es implementado para compensar las pérdidas de potencia dentro de la fibra. Posteriormente, la señal OFDM se recupera de la señal óptica transmitida por el receptor mediante un foto detector.

- CO-OFDM

Fue propuesto inicialmente por Shieh y Athaudage [51] para combatir la dispersión cromática de la fibra. Los sistemas CO-OFDM (*Coherent Optical OFDM*, *OFDM Óptica Coherente*) requieren una mayor dificultad en el diseño de los transceptores en comparación con la tecnología anteriormente mencionada IM/DD-OOFDM, sin embargo, tienen mejor eficiencia de ancho de banda, es robusto frente a dispersión de polarización y sensibilidad en el receptor. La figura 1.21 presenta el diagrama de bloques de un sistema de comunicaciones óptico que utiliza la tecnología CO-OFDM.

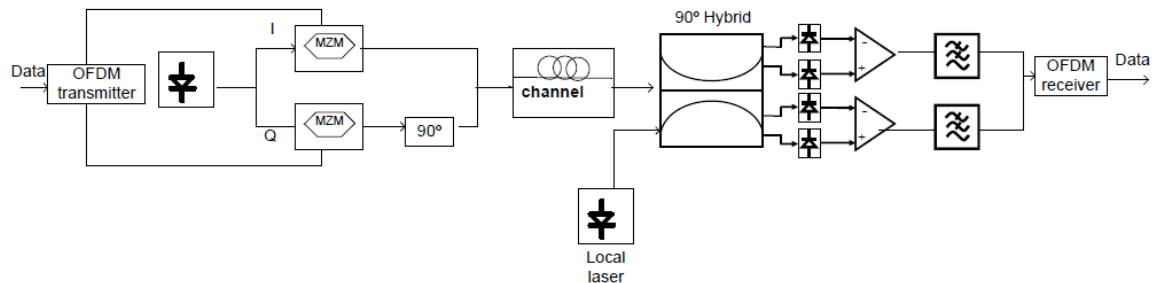


Figura 1.22 – Diagrama de bloques para CO-OFDM

La señal OFDM eléctrica es convertida al dominio óptico por medio de un modulador I/Q óptico, utilizando un modulador MZM (*Mach-Zehnder Modulator*, *Modulador Mach-Zehnder*), esta señal es enviada por la fibra óptica para ser entregada al receptor. La diferencia con los sistemas IM/DD-OOFDM es que la portadora óptica no es transmitida con la señal OFDM óptica modulada, sin embargo, se genera de manera local en el receptor mediante un láser local, con la ventaja de utilizar menos potencia para transmitir, aunque permite mayor sensibilidad frente al ruido de fase [49].

Como se observa en la figura 1.21 la señal del oscilador local es mezclada con la señal OFDM óptica en el receptor por medio del bloque “optical 90° Hybrid”⁴, encargado de realizar la detección óptica de las señales en fase y en cuadratura, acto seguido, cuatro fotodetectores son utilizados para recuperar la señal eléctrica, dos para la componente en cuadratura y dos para la componente en fase de la señal recibida. Finalmente, ambas componentes son pasadas por un bloque de filtro pasa bajas y demoduladas en el bloque OFDM receptor [52].

CAPITULO 2.

METODOLOGÍAS, HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN Y CASOS DE ESTUDIO

2.1. METODOLOGÍA DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

Lorem ipsum dolor sit amet consectetur adipiscing elit in, parturient blandit phasellus hac vitae dis etiam, vulputate hendrerit euismod dui curae porttitor fusce. Venenatis congue parturient nec leo ut convallis fringilla, himenaeos rhoncus laoreet suspendisse cum curae senectus, curabitur non nisi tempus consequat ultricies. Eget massa orci nunc per pulvinar fringilla luctus, diam ullamcorper parturient id habitasse lacinia, neque quam ut mus nullam ante.

2.2. METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN

⁴ **optical 90° Hybrid**, bloque importante en sistemas de transmisión coherente, el cual mezcla la señal entrante con la señal del oscilador local en el plano real y complejo, luego entrega las cuatro señales de luz a dos pares de fotodetectores balanceados [53].

Lorem ipsum dolor sit amet consectetur adipiscing elit in, parturient blandit phasellus hac vitae dis etiam, vulputate hendrerit euismod dui curae porttitor fusce. Venenatis congue parturient nec leo ut convallis fringilla, himenaeos rhoncus laoreet suspendisse cum curae senectus, curabitur non nisi tempus consequat ultricies. Eget massa orci nunc per pulvinar fringilla luctus, diam ullamcorper parturient id habitasse lacinia, neque quam ut mus nullam ante.

2.3. HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN PARA EL DESARROLLO DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

2.3.1. MATLAB

Lorem ipsum dolor sit amet consectetur adipiscing elit in, parturient blandit phasellus hac vitae dis etiam, vulputate hendrerit euismod dui curae porttitor fusce. Venenatis congue parturient nec leo ut convallis fringilla, himenaeos rhoncus laoreet suspendisse cum curae senectus, curabitur non nisi tempus consequat ultricies. Eget massa orci nunc per pulvinar fringilla luctus, diam ullamcorper parturient id habitasse lacinia, neque quam ut mus nullam ante.

2.3.2. OptSim

Lorem ipsum dolor sit amet consectetur adipiscing elit in, parturient blandit phasellus hac vitae dis etiam, vulputate hendrerit euismod dui curae porttitor fusce. Venenatis congue parturient nec leo ut convallis fringilla, himenaeos rhoncus laoreet suspendisse cum curae senectus, curabitur non nisi tempus consequat ultricies. Eget massa orci nunc per pulvinar fringilla luctus, diam ullamcorper parturient id habitasse lacinia, neque quam ut mus nullam ante.

2.3.3. OptiSystem

Lorem ipsum dolor sit amet consectetur adipiscing elit in, parturient blandit phasellus hac vitae dis etiam, vulputate hendrerit euismod dui curae porttitor fusce. Venenatis congue parturient nec leo ut convallis fringilla, himenaeos rhoncus laoreet suspendisse cum curae senectus, curabitur non nisi tempus consequat ultricies. Eget massa orci nunc per pulvinar fringilla luctus, diam ullamcorper parturient id habitasse lacinia, neque quam ut mus nullam ante.

2.3.4. Comparación y elección de herramienta de simulación

Lorem ipsum dolor sit amet consectetur adipiscing elit in, parturient blandit phasellus hac vitae dis etiam, vulputate hendrerit euismod dui curae porttitor fusce. Venenatis congue parturient nec leo ut convallis fringilla, himenaeos rhoncus laoreet suspendisse cum curae senectus, curabitur non nisi tempus consequat ultricies. Eget massa orci nunc per pulvinar fringilla luctus, diam ullamcorper parturient id habitasse lacinia, neque quam ut mus nullam ante.

CAPITULO 3.

DISEÑO DE LA PROPUESTA DE UNA RED CONVERGENTE

Lorem ipsum dolor sit amet consectetur adipiscing elit in, parturient blandit phasellus hac vitae dis etiam, vulputate hendrerit euismod dui curae porttitor fusce. Venenatis congue parturient nec leo ut convallis fringilla, himenaeos rhoncus laoreet suspendisse cum curae senectus, curabitur non nisi tempus consequat ultricies. Eget massa orci nunc per pulvinar fringilla luctus, diam ullamcorper parturient id habitasse lacinia, neque quam ut mus nullam ante.

CAPITULO 4.

RESUMEN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. RESUMEN

Lorem ipsum dolor sit amet consectetur adipiscing elit in, parturient blandit phasellus hac vitae dis etiam, vulputate hendrerit euismod dui curae porttitor fusce. Venenatis congue parturient nec leo ut convallis fringilla, himenaeos rhoncus laoreet suspendisse cum curae senectus, curabitur non nisi tempus consequat ultricies. Eget massa orci nunc per pulvinar fringilla luctus, diam ullamcorper parturient id habitasse lacinia, neque quam ut mus nullam ante.

4.2. CONCLUSIONES

Lorem ipsum dolor sit amet consectetur adipiscing elit in, parturient blandit phasellus hac vitae dis etiam, vulputate hendrerit euismod dui curae porttitor fusce. Venenatis congue parturient nec leo ut convallis fringilla, himenaeos rhoncus laoreet suspendisse cum curae senectus, curabitur non nisi tempus consequat ultricies. Eget massa orci nunc per pulvinar fringilla luctus, diam ullamcorper parturient id habitasse lacinia, neque quam ut mus nullam ante.

4.3. RECOMENDACIONES

Lorem ipsum dolor sit amet consectetur adipiscing elit in, parturient blandit phasellus hac vitae dis etiam, vulputate hendrerit euismod dui curae porttitor fusce. Venenatis congue parturient nec leo ut convallis fringilla, himenaeos rhoncus laoreet suspendisse cum curae senectus, curabitur non nisi tempus consequat ultricies. Eget massa orci nunc per pulvinar fringilla luctus, diam ullamcorper parturient id habitasse lacinia, neque quam ut mus nullam ante.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] H. S. Abbas and M. A. Gregory, "The next generation of passive optical networks: A review," *J. Netw. Comput. Appl.*, no. 67, pp. 53–74, 2016.
- [2] D. Spears, B. Ford, P. Shumate, and R. Menendez, "FSAN initiative propels broadband access worldwide," *Lightwave*, California, pp. 60–89, Sep-1999.
- [3] H. S. Abbas and M. A. Gregory, "The next generation of passive optical networks: A review," *J. Netw. Comput. Appl.*, vol. 67, no. 67, pp. 53–74, May 2016.
- [4] A. M. Ragheb and H. Fathallah, "Candidate modulation schemes for next generation- passive optical networks (NG-PONs)," in *High Capacity Optical Networks and Enabling Technologies ((HONET))*, 2012, pp. 226–231.
- [5] F. C. Europe, "FTTH Handbook." FTTH Council Europe, 2018.
- [6] J. A. Altabas, S. Sarmiento, and J. A. Lazaro, "Passive Optical Networks, Introduction." Universitat Politècnica de Catalunya, Spain, 2018.
- [7] J. C. Ballesta and J. Boltimore, "PASSIVE OPTICAL NETWORK (PON): FEATURES AND BENEFITS," *RACCIS*, vol. 7, no. 2, pp. 4–9, 2017.
- [8] Vinita, "A Comprehensive Review of Recent Advancement in Optical Communication Networks," *Int. J. Comput. Sci. Eng.*, vol. 6, no. 9, pp. 617–626, 2018.

- [9] S. N. T. UIT, "Sistemas de acceso óptico de banda ancha basados en redes ópticas pasivas." Recomendación UIT-T G.983.1, Ginebra, 2005.
- [10] S. N. T. UIT, "Especificación de la interfaz de control y gestión de terminales de red óptica para redes ópticas pasivas de banda ancha." Recomendación UIT-T G.983.2, Ginebra, 2007.
- [11] S. N. T. UIT, "Sistema de acceso óptico de banda ancha con capacidad de servicio incrementada mediante la asignación de longitudes de onda." Recomendación UIT-T G.983.3, Ginebra, 2001.
- [12] S. N. T. UIT, "Sistema de acceso óptico de banda ancha con asignación dinámica de anchura de banda para aumentar la capacidad de servicio." Recomendación UIT-T G.983.4, Ginebra, 2001.
- [13] S. N. T. UIT, "Sistema de acceso óptico de banda ancha con mayor capacidad de supervivencia." Recomendación UIT-T G.983.5, Ginebra, 2002.
- [14] T. S. S. ITU, "Gigabit-capable passive optical networks (GPON): General characteristics." Recommendation ITU-T G.984.1, Ginebra, 2008.
- [15] T. S. S. ITU, "Gigabit-capable passive optical networks (G-PON): Transmission convergence layer specification." Recommendation ITU-T G.984.3, Ginebra, 2014.
- [16] T. S. S. ITU, "Gigabit-capable Passive Optical Networks (G-PON): ONT management and control interface specification." Recommendation ITU-T G.984.4, Ginebra, 2008.
- [17] T. S. S. ITU, "Gigabit-capable passive optical networks (GPON): Enhancement band." Recommendation ITU-T G.984.5, Ginebra, 2014.
- [18] T. S. S. ITU, "Gigabit-capable passive optical networks (GPON): Reach extension." Recommendation ITU-T G.984.6, Ginebra, 2008.
- [19] T. S. S. ITU, "Gigabit-capable passive optical networks (GPON): Long reach." Recommendation ITU-T G.984.7, Ginebra, 2010.
- [20] Sergio Abel Ramírez Zapata, "DISEÑO DE UNA RED DE FTTH PARA EL ACCESO DE BANDA ANCHA EN EL CONDOMINIO GALILEA – CASTILLA, UTILIZANDO TECNOLOGÍA GPON," UNIVERSIDAD NACIONAL DE PIURA, 2019.
- [21] M. V. M. ANCHAPANTA, "DISEÑO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LA RED FTTH PARA EL SERVICIO DE INTERNET PROVISTO POR LA EMPRESA IPLANET S.A. EN YARUQUÍ Y TABABELA MEDIANTE LA EVALUACIÓN DE ESTÁNDARES PON.," UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA ISRAEL, 2019.
- [22] S. N. T. UIT, "Visión general de las redes de próxima generación." Recomendación UIT-T Y.2001, Ginebra, 2004.
- [23] S. D. N. UIT, "Visión general de las redes de próxima generación." Recommendation UIT-T Y. 2001, Ginebra, 2004.
- [24] T. S. S. ITU, "10-Gigabit-capable passive optical network (XG-PON) systems: Definitions, abbreviations and acronyms." Recommendation ITU-T G.987, Ginebra, 2012.
- [25] T. S. S. ITU, "10-Gigabit-capable passive optical networks (XG-PON): General requirements." Recommendation ITU-T G.987.1, Ginebra, 2016.

- [26] T. S. S. ITU, "10-Gigabit-capable passive optical networks (XG-PON): Physical media dependent (PMD) layer specification." Recommendation ITU-T G.987.2, Ginebra, 2017.
- [27] T. S. S. ITU, "10-Gigabit-capable passive optical networks (XG-PON): Transmission convergence (TC) layer specification." Recommendation ITU-T G.987.3, Ginebra, 2014.
- [28] T. S. S. ITU, "10 Gigabit-capable passive optical networks (XG-PON): Reach extension." Recommendation ITU-T G.987.4, Ginebra, 2012.
- [29] T. S. S. ITU, "10-Gigabit-capable symmetric passive optical network (XGS-PON)." Recommendation ITU-T G.9807.1, Ginebra, 2016.
- [30] T. S. S. ITU, "10 Gigabit-capable passive optical networks (XG(S)-PON): Reach extension." Recommendation ITU-T G.9807.2, Ginebra, 2017.
- [31] T. S. S. ITU, "40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): General requirements." Recommendation ITU-T G.989.1, Ginebra, 2013.
- [32] T. S. S. ITU, "40-Gigabit-capable passive optical networks 2 (NG PON2): Physical media dependent (PMD) layer specification." Recommendation ITU-T G.989.2, Ginebra, 2019.
- [33] T. S. S. ITU, "40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): Transmission convergence layer specification." Recommendation ITU-T G.989.3, Ginebra, 2019.
- [34] Comisión de Regulación de Telecomunicaciones de Colombia, "Regulación de redes en convergencia (NGN)," *Doc. Estud.*, p. 59, 2008.
- [35] J. Rodríguez Luque and S. Clavijo Suero, "MODULACIÓN DE SEÑALES DIGITALES," Universidad de Sevilla, 1995.
- [36] C. Universitaria, "ANÁLISIS DE TÉCNICAS DE MODULACIÓN ADAPTIVA Tesis que para obtener el título de Ingeniero en Telecomunicaciones Presentan : Ximena López Quiroz Christian Mora Martínez Director de Tesis : Dr . Víctor Rangel Licea," 2006.
- [37] et al. A. García, "Patrones Eficientes de Pilotos en Sistemas OFDM para Canales Inalámbricos Selectivos en Tiempo y Frecuencia." Universidad Rey Juan Carlos, España, 2005.
- [38] R. H. Sharma and K. R. Bhatt, "A Review on Implementation of QAM on FPGA," *Int. J. Innov. Res. Comput. Commun. Eng.*, vol. 3, no. 3, pp. 1684–1688, 2015.
- [39] CÉSAR AUGUSTO ÁLVAREZ ÁLVAREZ and KAREN CRISTINA GÓMEZ MUÑOZ, "ANÁLISIS COMPARATIVO DEL DESEMPEÑO A NIVEL FÍSICO DE OFDM Y SC FDM," Universidad del Cauca, 2014.
- [40] M. A. Tilleria, "DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO DE TELECOMUNICACIONES APLICADAS A LA MODULACIÓN Y DEMODULACIÓN DIGITAL A TRAVÉS DE LA HERRAMIENTA MATLAB/SIMULINK," Escuela Politecnica Nacional, Quito, Ecuador, 2016.
- [41] R. D. Guayaquil Llor, "Diseño de una GUI en MATLAB para evaluar técnicas de modulación de amplitud en cuadratura (QAM)," Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, 2018.

- [42] J. García, “Aportaciones a nuevos estándares de televisión digital,” Universidad de Sevilla, 2011.
- [43] G. Gomez and G. López, “Formatos Avanzados de Modulación y su Implementación en las Tecnologías del Futuro.” Universidad del Cauca, Popayán.
- [44] D. Pérez Calderón, C. Oria, J. García, P. López, V. Baena, and I. Lacadena, “Rotated Constellations for DVB-T2.” Universidad de Sevilla, Sevilla, 2008.
- [45] R. Karthikeyan and S. Prakasam, “Performance of Bit Error Rate and Q-Factor for OFDM-RoF System using QAM Modulation,” *Curr. Trends Technol. Sci.*, vol. VII, no. I, pp. 827–835.
- [46] M. C. D. Maddocks, “AN INTRODUCTION TO DIGITAL MODULATION AND OFDM TECHNIQUES.” THE BRITISH BROADCASTING CORPORATION, England, 1993.
- [47] L. N. Binh, *Advanced Digital Optical communications*, Second edi. Alemania: CRC Press, 2015.
- [48] W. Tomasi, *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas*, 4ª Edición. Pearson Educación, 2003.
- [49] AHMED SAID AL SHANTTi, “Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing Direct Detection for Improving Capacity of Radio over Fiber Transmission System,” The Islamic University of Gaza, 2012.
- [50] Z. COMMUNICATIONS, “Optical Wireless Communications,” *Editorial Office of ZTE Communications*, Nov-2016.
- [51] W. Shieh and C. Athaudage, “Coherent optical orthogonal frequency division multiplexing.” *Electron. Lett.*, 2006.
- [52] Laia Nadal Reixats, “Performance analysis of optical OFDM transmission systems using PAPR mitigation techniques and alternative transforms.,” Universitat Politècnica de Catalunya, 2012.
- [53] O. Corporation, “90-Degree Optical Hybrid.” Optoplex Corporation, Fremont, U.S.A.