

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

**FACULTAD DE DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y
ELECTRÓNICA**

**REDES DE ACCESO ÓPTICAS: EVALUACIÓN EXPERIMENTAL Y
COMPARACIÓN DE TECNOLOGÍAS**

**ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LA TRANSMISIÓN DE LAS
FORMAS DE ONDA UPMC Y GFDM EN UNA RED DE ACCESO
ÓPTICA**

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

ERICK ALFREDO CIFUENTES ILBAY
erick.cifuentes@epn.edu.ec

DIRECTOR: PhD. CHRISTIAN JOSÉ TIPANTUÑA TENELEMA
christian.tipantuna@epn.edu.ec

DMQ, abril 2024

CERTIFICACIONES

Yo, ERICK ALFREDO CIFUENTES ILBAY declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

ERICK ALFREDO CIFUENTES ILBAY

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por ERICK ALFREDO CIFUENTES ILBAY, bajo mi supervisión.

PHD. CHRISTIAN JOSE TIPANTUÑA TENELEMA
DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

ERICK ALFREDO CIFUENTES ILBAY

PHD. CHRISTIAN JOSÉ TIPANTUÑA TENELEMA

MSC. JOHANNA BERENICE ARGUERO TELLO

DEDICATORIA

A mis padres.

AGRADECIMIENTO

A mi padres Alfredo y Mirian por todo el apoyo que me brindaron durante mi carrera, de inicio a fin. Todo esto no hubiese sido posible sin ustedes. A mis hermanos Cristina y Alecksey, que me han incentivado a perseguir mis metas y no darme por vencido.

A mi abuelita Gladys, que siempre me ha apoyado y me ha motivado a seguir adelante. A mi bisabuelita Rosita, que desde el cielo sé que me cuida y guía mi camino. A mis abuelitos, tíos, primos y demás familiares, por sus consejos y enseñanzas.

A David, Eduardo, Steve y Karolina, personas excepcionales con quienes compartí gratas experiencias en la universidad, gracias por brindarme su amistad.

A M.Sc. Edison Tatayo, por sus enseñanzas y consejos, y más que un gran docente, un buen amigo con quien tuve la oportunidad de compartir buenos momentos en mi paso por el laboratorio, donde logré adquirir mucho conocimiento.

A M.Sc. Christian Tipantuña por su paciencia en la realización de este trabajo, pero sobre todo por descubrir en mí grandes destrezas y habilidades que me serán muy útiles en mi vida profesional y personal.

A M.Sc. Berenice Arguero por el gran apoyo en el desarrollo de este proyecto.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTO	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO	VI
RESUMEN	VII
ABSTRACT	VIII
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivo general	2
1.2 Objetivos específicos	3
1.3 Alcance	3
1.4 Marco teórico	3
1.4.1 Redes móviles 5G	3
1.4.2 Radio sobre Fibra	5
1.4.3 Redes PON	8
1.4.4 Forma de onda UPMC	12
1.4.5 Forma de onda GFDM	15
2 METODOLOGÍA	19
2.1 Análisis de Requerimientos	20
2.2 Herramientas de software	21
2.2.1 Matlab	21
2.2.2 Agilent Control Utility	22
2.3 Transmisión de datos	22
2.3.1 Transmisor UPMC	23
2.3.2 Transmisor GFDM	26
2.4 Implementación del canal óptico	29
2.4.1 Generador Arbitrario de Forma de Onda	31
2.4.2 Láser de Onda Continua	33
2.4.3 Modulador óptico	34
2.4.4 Fibra óptica	35
2.4.5 Atenuador variable	37

2.4.6	Fotodetector PIN	38
2.4.7	Analizador Digital de Señales	39
2.5	Recepción de datos	40
2.5.1	Receptor UFMC	41
2.5.2	Receptor GFDM	42
2.6	Cálculo de errores	44
2.6.1	Cálculo de BER	44
2.6.2	Cálculo de EVM	44
2.7	Obtención de gráficas de control en Matlab	45
2.7.1	Diagrama de constelación	45
2.7.2	Densidad Espectral de Potencia	46
3	RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	47
3.1	Resultados	47
3.1.1	Configuración de parámetros	47
3.1.2	Resultados generales del sistema RoF	48
3.1.3	Resultados obtenidos al modificar las características del sistema	51
3.2	Conclusiones	61
3.3	Recomendaciones	62
4	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63
5	ANEXOS	I

RESUMEN

En los últimos años, el aumento exponencial de dispositivos conectados a Internet ha superado la capacidad de las tecnologías celulares de cuarta generación (4G), dejándolas insuficientes para satisfacer la demanda. Es por ello que se está trabajando en el desarrollo de nuevas tecnologías y técnicas de transmisión para las redes celulares de próxima generación, conocidas como 5G, con el objetivo de ofrecer un servicio superior al usuario, caracterizado por una mayor velocidad de transmisión, un ancho de banda ampliado y una menor latencia posible.

En el presente proyecto, se llevó a cabo una revisión de los fundamentos teóricos de las técnicas de modulación multi-portadora filtrada universal (UFMC: Universal Filtered Multi-Carrier) y de multiplexación por división de frecuencia generalizada (GFDM: Generalized Frequency Division Multiplexing). El propósito fue implementar físicamente un sistema de comunicaciones con equipos de laboratorio, capaz de transmitir ambas formas de onda a través de un esquema de redes ópticas pasivas (PON: Passive Optical Network) en un sistema de radio sobre fibra (RoF: Radio over Fiber) y que se asemeje a un enlace de fronthaul en una red de acceso de próxima generación (NG-RAN: Next Generation Radio Access Network).

Se llevó a cabo un análisis comparativo del rendimiento de las técnicas UFMC y GFDM, variando el esquema de modulación digital y la potencia óptica que llega al receptor. Este análisis se basó en la tasa de bits erradps (BER: Bit Error Rate) y la magnitud del vector de error (EVM: Error Vector Magnitude), permitiendo así evaluar y comparar la eficacia de ambas tecnologías.

PALABRAS CLAVE: UFMC, GFDM, 5G, RoF, PON, fronthaul.

ABSTRACT

In recent years, the exponential growth of Internet-connected devices has exceeded the capacity of fourth-generation cellular technologies (4G), rendering them inadequate to meet the demand. That is why efforts are underway to develop new technologies and transmission techniques for next-generation cellular networks, known as 5G, aimed at providing superior service to users, characterized by higher transmission speeds, expanded bandwidth, and minimized latency.

In this project, a review of the theoretical fundamentals of Universal Filtered Multi-Carrier (UFMC) and Generalized Frequency Division Multiplexing (GFDM) modulation techniques was conducted. The purpose was to physically implement a communication system using laboratory equipment capable of transmitting both waveforms through a Passive Optical Network (PON) in a Radio over Fiber (RoF) system, resembling a fronthaul link in a Next Generation Radio Access Network (NG-RAN).

A comparative analysis of the performance of UFMC and GFDM techniques was conducted by varying the digital modulation scheme and optical power reaching the receiver. This analysis was based on the Bit Error Rate (BER) and the Error Vector Magnitude (EVM), allowing for the evaluation and comparison of the effectiveness of both technologies.

KEYWORDS: UFMC, GFDM, 5G, RoF, PON, fronthaul.

1 INTRODUCCIÓN

El desarrollo de las telecomunicaciones en los últimos años ha crecido de manera exponencial, tanto en número de usuarios como de dispositivos conectados. Debido a esta demanda creciente, es necesario encaminar las tecnologías de redes móviles hacia una nueva generación que soporte un alto tráfico de datos, mejor conectividad inalámbrica con un amplio ancho de banda, una latencia reducida y una mayor velocidad de transmisión en comparación con las generaciones anteriores (por ejemplo, 4G). La solución que es capaz de cumplir con dichos requerimientos es conocida como redes móviles de quinta generación o simplemente 5G [1].

A pesar de que los sistemas celulares de cuarta generación o 4G han sido optimizados con el fin de aumentar la tasa de transmisión de datos y lograr una cobertura mayor de usuarios, no cubre el crecimiento de dispositivos conectados, y sobre todo, los nuevos requerimientos de conectividad, ya que la demanda excede la capacidad. La principal ventaja de utilizar 5G sobre las redes móviles 4G es la capacidad de proveer una conectividad de alta velocidad, en el orden de los 10 Gbps [2].

Así como en el 4G se utiliza la tecnología de multiplexación por división de frecuencias ortogonal (OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing), en los sistemas 5G se opta por utilizar las formas de onda de frecuencia multiportadora universal (UFMC: Universal Frequency Multi-Carrier) y de multiplexación por división de frecuencia generalizada (GFDM: Generalized Frequency Division Multiplexing) debido a que ofrecen un mejor desempeño y optimizan el uso del espectro de frecuencia [3]. OFDM es una técnica de modulación muy aplicada en comunicaciones inalámbricas y utiliza por cada símbolo un segmento redundante llamado prefijo cíclico (CP: Cyclic Prefix) [4]. A pesar de ser una técnica muy utilizada en las comunicaciones actuales, OFDM posee ciertas limitaciones que lo catalogan como una tecnología no adecuada en el despliegue de las redes móviles 5G. Al añadir el CP, se adiciona redundancia en la transmisión por lo que se produce una sobrecarga que puede expresarse en función de la duración del CP y la duración del símbolo OFDM. Esta sobrecarga en tiempo puede ser del 6.6% al 7.2% en un CP normal, mientras que en un CP extendido es del 20%. Además, la ortogonalidad de OFDM funciona suponiendo que tanto el transmisor como el receptor utilizan la misma frecuencia. Sin embargo, cuando existe descompensaciones de frecuencia, se pierde la ortogonalidad y provoca la interferencia entre portadoras o canales (ICI: Inter-Channel Interference) [5].

La forma de onda UFMC es una variante de la técnica OFDM, donde se distribuyen las diferentes sub-portadoras en sub-bandas y se usa un banco de filtros para cada sub-banda y no para cada sub-portadora como ocurre en la modulación multiportadora con banco de filtros (FMBC: Filter Bank Multi-Carrier). En UFMC no se utiliza un CP por lo que la duración del símbolo disminuye y se aumenta considerablemente la eficiencia espectral [6]. Al ser una generalización de OFDM, UFMC utiliza la transformada rápida de Fourier (FFT: Fast Fourier Transform), puede trabajar con la modulación de amplitud en cuadratura (QAM: Quadrature Amplitude Modulation) y es compatible con la tecnología de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO: Multiple Input Multiple Output). De esta forma, UFMC llega a ser un candidato prometedor para usarse en los sistemas 5G [7].

En el caso de la forma de onda GFDM, el objetivo principal es el mejoramiento de la eficiencia espectral por lo que se utiliza un solo CP por todo el bloque y no por cada símbolo, tal como en OFDM. Esta técnica de modulación no se centra en la ortogonalidad, y por lo tanto, deja a un lado el sincronismo. Sin embargo, esto recae en la complejidad del receptor para contrarrestar el efecto de la interferencia entre símbolos (ISI: Inter-Symbol Interference) y el ICI [8]. GFDM es eficiente en el uso del espectro de frecuencia, posee robustez ante las interferencias y es compatible con múltiples dispositivos. Esto lo convierte en una excelente alternativa para usarse en las redes móviles 5G [2].

Para el acceso a los sistemas móviles se utilizan enlaces de fronthaul de fibra óptica, donde se transmite una señal de radiofrecuencia (RF: Radio Frequency) y sirve para interconectar las radio bases, dicho esquema de transmisión recibe el nombre de radio sobre fibra (RoF: Radio over Fiber). En los sistemas 5G, la tecnología RoF solventa algunos parámetros de transmisión, entre ellos se encuentra la tasa de transmisión y el ancho de banda. Utilizar la fibra óptica como medio de transmisión brinda una gran ventaja ya que se puede enviar y recibir gran cantidad de información, tales como datos, video y telefonía, permitiendo que las redes celulares admitan millones de dispositivos conectados y brindando una buena experiencia de conectividad al usuario, en cuanto a menor latencia y mayor velocidad y cobertura [9].

1.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar experimentalmente la transmisión de las formas de onda UFMC y GFDM en una red de acceso óptica.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Describir el fundamento teórico referente a radio sobre fibra, redes PON, UFMC y GFDM.
2. Diseñar un sistema de comunicaciones óptica de radio sobre fibra que permita la transmisión de las formas de onda UFMC y GFDM.
3. Implementar el sistema de comunicaciones óptico diseñado utilizando equipamiento del Laboratorio de Comunicaciones Ópticas del DETRI.
4. Analizar los resultados obtenidos considerando variación de parámetros de transmisión y utilizando métricas como el BER y el EVM.

1.3 ALCANCE

El presente trabajo de integración curricular tiene como objetivo el análisis de la transmisión de las formas de onda UFMC y GFDM en una red PON. Para lo cual se empieza con la revisión bibliográfica acerca de los conceptos de radio sobre fibra, redes PON y las formas de onda UFMC y GFDM. También se realiza una revisión a las características y parámetros de operación de los equipos y dispositivos que se van a utilizar en la implementación de la red PON y de la transmisión y recepción de señales (UFMC y GFDM). A continuación, se realiza el diseño del sistema de comunicaciones óptico por el cual se realizará la transmisión de UFMC y GFDM. Posteriormente, se lleva a cabo la implementación física del diseño realizado utilizando los equipos disponibles en el Laboratorio de Comunicaciones Ópticas del DETRI. Además, se procede a una variación de parámetros de transmisión y se analizan los resultados en base a la información de métricas como la tasa de bits errados (BER: Bit Error Rate) y la magnitud de vector de error (EVM: Error Vector Magnitude) tanto para UFMC y GFDM. Finalmente, se presentan tablas de valores y gráficas comparativas de los resultados de BER y EVM para cada técnica de modulación, contrastando el rendimiento de las formas de onda analizadas.

1.4 MARCO TEÓRICO

1.4.1 REDES MÓVILES 5G

A pesar de que en las redes móviles 4G se manejan anchos de banda suficientes para el uso cotidiano, existe una verdadera necesidad de desplegar la tecnología 5G o de Nueva Radio (NR: New Radio) ya que considera parámetros adicionales como la latencia, la confiabilidad, el rendimiento, el volumen de datos y la movilidad, sin dejar de lado el ancho

de banda. Existen dos factores importantes que impulsan el desarrollo de esta nueva generación de sistema celular: i) la creciente demanda de ancho de banda inalámbrico para la transmisión de video y otros servicios con alto contenido de información, y ii) el Internet de las cosas (IoT: Internet of Things) debido a la necesidad de interconectar millones de dispositivos inteligentes mediante Internet [3].

El principal beneficio de 5G en comparación con 4G es la capacidad de proveer una conectividad muy rápida, con una tasa de transmisión máxima de 20 Gbps y una latencia de apenas unos pocos milisegundos. La tasa de confiabilidad se maneja en aproximadamente 99.999%. Las velocidades de datos por usuario alcanza los 100 Mbps y permite una movilidad de hasta 500 km/h. La Figura 1.1 muestra una comparativa más general, tomando en cuenta a 4G en su versión LTE-Advanced (estándar IMT-Advanced) y los requerimientos del estándar IMT-2020 para 5G [5].

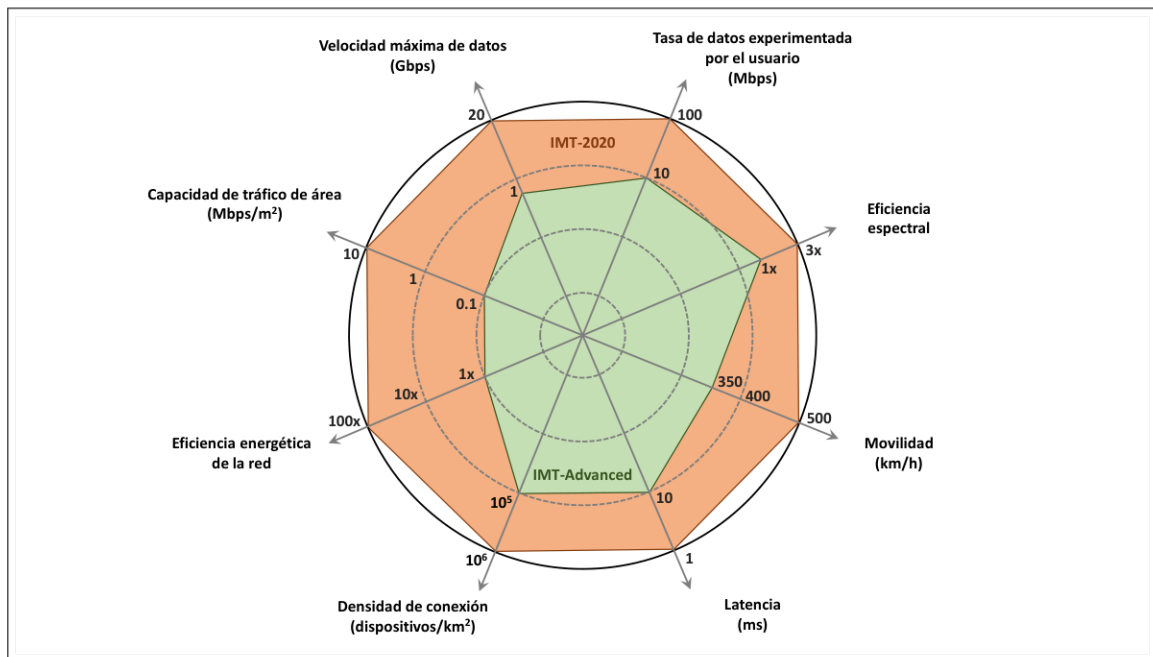


Figura 1.1: Comparación de las tecnologías 4G (IMT-Advanced) y 5G (IMT-2020), basado en [5].

La tecnología celular 5G es la primera en manejar frecuencias de ondas milimétricas, entre los 30 y 100 GHz. El objetivo del uso de este espectro es conseguir una mayor capacidad de transmisión, pero con una menor cobertura y penetración en las edificaciones [10]. Para el manejo del espectro en las redes de banda ancha móvil (MBB: Mobile Broadband Networks), 5G trabaja en los siguientes rangos de frecuencias:

- ❑ **Inferior a 1 GHz:** Brinda una amplia cobertura en áreas urbanas, suburbanas y rurales, ya que funciona con macro celdas [11].

- ❑ **Entre 1 y 6 GHz:** Se incluye celdas más pequeñas a las menores de 1 GHz para las aplicaciones que trabajan hasta 6 GHz ofreciendo un equilibrio entre capacidad y cobertura [11].
- ❑ **Superior a 6 GHz:** Son principalmente las bandas de 26 y 28 GHz que permiten manejar tasas de transmisión de hasta 10 Gbps, ofreciendo servicios de video en vivo y realidad aumentada [11].

Dado que el objetivo principal de 5G es llegar a altas velocidades de transmisión, se opta por utilizar técnicas de diversidad como MIMO. Esta consiste en la utilización de múltiples antenas tanto en transmisión como en recepción para la transmisión simultánea de varios flujos de datos. La señal que se envía o se recibe en la antena llega mediante una fibra óptica, dando lugar a la coexistencia de las redes móviles y las redes ópticas basándose en una tecnología de fronthaul^[1] [13].

1.4.2 RADIO SOBRE FIBRA

La tecnología RoF consiste en la transmisión de señales de RF mediante la utilización de la fibra óptica y es ampliamente utilizado en la intercomunicación de estaciones base (BS: Base Station) en los sistemas celulares, por lo tanto, se distribuye las señales de RF por un medio guiado [14]. La principal ventaja de RoF es la posibilidad de concentrar un equipo transmisor en un solo lugar conocido como oficina central (CO: Central Office) o estación central (CS: Central Station), donde también se centraliza las funciones de procesamiento de señales. Además, los equipos restantes, como láseres y fotodetectores, pueden instalarse en diferentes lugares, dado que son de tamaño reducido y poseen bajo consumo de potencia [15].

Los sistemas de comunicación inalámbrica utilizan RoF a través de un sistema de antenas distribuidas (DAS: Distributed Antennas System), en la que se localizan varias BSes en ciertas zonas para extender la cobertura. Así los sistemas RoF permiten realizar funciones de movilidad, transporte y radiofrecuencia, en donde se incluye modulación y procesamiento de la señal. La señal óptica funciona como una portadora de RF y modula a la señal de radio para transmitirla por medio de la fibra óptica entre la CO y cada una de las BSes [14].

^[1] **Fronthaul:** Un enlace de fronthaul es la conexión de una red de acceso por radio (RAN: Radio Access Radio) entre una unidad de banda base (BBU: Base-Band Unit) con los cabezales de radio remoto (RRU: Remote Radio Head), permitiendo el transporte de información entre las antenas celulares y el resto de la red [12].

Las BSes se encargan de realizar la conversión de señales ópticas a eléctricas, y viceversa, donde la señal eléctrica puede estar modulada en amplitud, frecuencia o fase. Sin embargo, el sistema RoF utiliza generalmente la modulación de intensidad con detección directa (IM-DD: Intensity Modulation Direct Detection). En la parte del transmisor, se utiliza un láser el cual modula mediante intensidad óptica a la señal eléctrica, mientras que en la parte del receptor, se hace uso de un fotodetector para pasar la señal óptica a eléctrica, y así pueda radiarse con una antena [15]. Este funcionamiento se resume en la Figura 1.2.

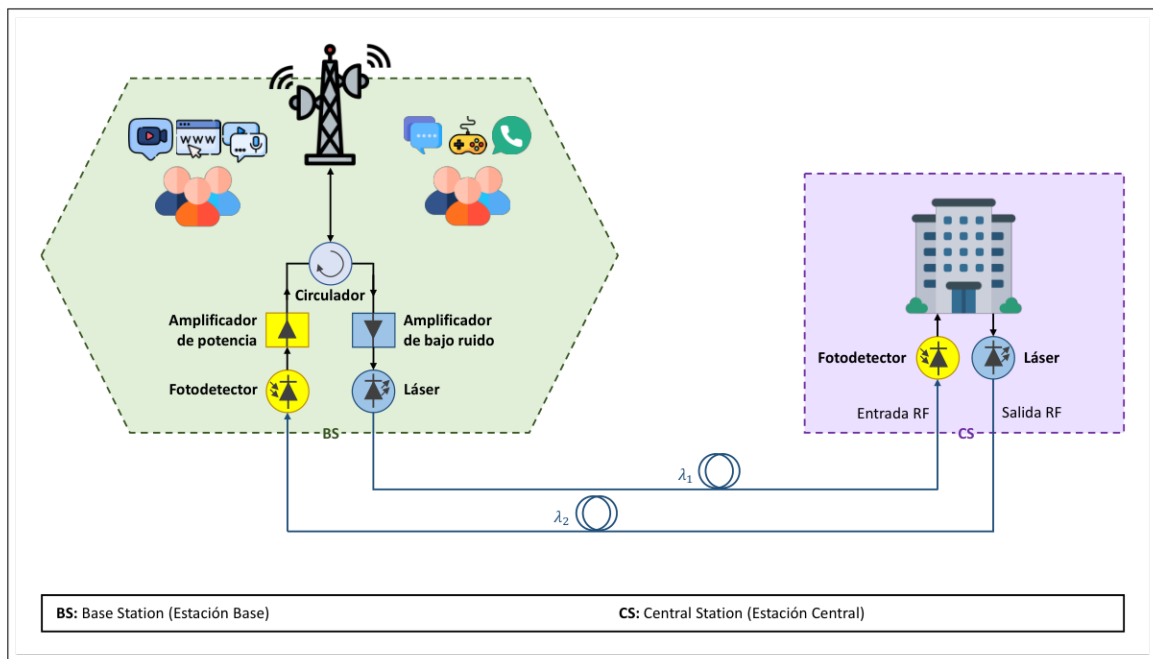


Figura 1.2: Esquema general de funcionamiento de un sistema RoF, basado en [14].

1.4.2.1 Ventajas

RoF es una solución óptima para el transporte de señales de radio por medio óptico, ya que presenta las siguientes ventajas:

- ❑ **Bajas pérdidas por atenuación:** La transmisión de señales de alta frecuencia por aire o por medio de cobre es muy costosa y además, trae consigo pérdidas ocasionadas por la reflexión y absorción. Si bien se podría tener equipos de regeneración, esto conduce a que las BSes sean complejas y económicamente ineficientes. RoF aprovecha la baja pérdida que ofrece la fibra óptica monomodo (SMF: Single Mode Fiber), la cual es de 0.2 dB/km para 1550 nm. Este valor es mucho más bajo que las

pérdidas obtenidas en un medio de cobre, por ejemplo, el cable coaxial de 1/2 pulgada que posee una pérdida de 500 dB/km en frecuencias superiores a 5 GHz [14].

- ❑ **Enorme ancho de banda:** La fibra SMF ofrece un enorme ancho de banda, el cual supera los 50 THz. Sin embargo, los sistemas comerciales de última generación utilizan un máximo de 1.6 THz. Es por esto que videos, datos, telefonía y otros servicios pueden transmitirse por medio de un único hilo. El gran ancho de banda ofrecido por la fibra óptica es obstaculizado por la limitación de los sistemas electrónicos provocando un “cuello de botella”. Este problema puede solucionarse al utilizar técnicas de multiplexación ópticos digitales y analógicos. Una técnica digital es la multiplexación por división de onda densa (DWDM: Dense Wavelength Division Multiplexing) y una analógica es la multiplexación de subportadora (SCM: Sub-Carrier Multiplexing) [14][16].
- ❑ **Inmunidad a la interferencia de RF:** RoF es inmune a las interferencias electromagnéticas (EMI: Electro-Magnetic Interference) debido a que la señal se transmite en forma de luz, lo que ofrece seguridad y privacidad en las comunicaciones de RF e inclusive de ondas milimétricas [9][14].
- ❑ **Fácil instalación y mantenimiento:** Los equipos complejos y costosos se alojan en las CO, lo que hace que las BS sean más simples. Como mínimo, las BS se forman de un fotodetector, un amplificador de RF y la antena, mientras que los equipos de modulación y conmutación son compartidos por varias BSES, lo que reduce significativamente los costos de instalación y mantenimiento del sistema [14].
- ❑ **Reducido consumo energético:** Como consecuencia de tener unas BSES más simples y de compartir varios equipos de procesamiento desde una sola CS, el consumo de energía se reduce. Los sistemas de RoF que funcionan en 5 GHz mantienen picoceldas, donde las BSES funcionan en modo pasivo. Este es un punto clave en los sistemas celulares, ya que a veces las BSES son colocadas en locaciones remotas donde no llega la red eléctrica [14].

1.4.2.2 Desventajas

Dado que RoF es la combinación de transmisiones por medio óptico y por radiofrecuencia, presenta ciertas desventajas:

- ❑ **Rango dinámico:** El rango dinámico (DR: Dynamic Range) es una restricción más de RoF, debido a que este parámetro determina la amplitud máxima y mínima que necesita la señal recibida para recuperar la información de forma correcta. Este valor varía según la distancia de los equipos móviles hacia las BSes dentro de una misma celda [14][15].
- ❑ **Ruidos introducidos:** En los enlaces ópticos se introducen fuentes de ruido como el ruido de intensidad relativa (RIN: Relative Intensity Noise) causado por el láser, el ruido de disparo del fotodiodo, el ruido de fase que ocurre al utilizar modulaciones de fase, entre otros. Mientras tanto en la parte eléctrica se produce el ruido térmico ocasionado por el amplificador [14].
- ❑ **Dispersión cromática:** Es un efecto producido por el material de la fibra SMF que superpone los pulsos ópticos adyacentes y genera ISI [17]. Como consecuencia limita la longitud del enlace y aumenta del ruido de fase de la portadora de RF [14].

1.4.3 REDES PON

Una red óptica pasiva (PON: Passive Optical Network) es un tipo de red que ofrece una variedad de servicios de banda ancha a los usuarios a través de fibra óptica. La PON permite eliminar todos los componentes activos entre el servidor y el cliente, introduciendo en su lugar componentes ópticos pasivos para dirigir el tráfico a lo largo de la red convirtiéndola en una tecnología rentable. El uso de una arquitectura pasiva puede reducir costos y se utiliza principalmente en redes de fibra al hogar (FTTH: Fiber to the Home) [18]. Las PON abordan una alta petición de ancho de banda dado que se ofrecen gran cantidad de servicios como Internet, video bajo demanda y telefonía sobre IP. Además, se emplea en los enlaces tanto de backhaul^[2] como de fronthaul de los sistemas celulares, incluido el 5G [19].

La arquitectura PON, representada en la Figura 1.3, consta de los siguientes equipos: i) una terminal de línea óptica (OLT: Optical Line Terminal) en la oficina central del proveedor de servicios y ii) un número de terminales de red óptica (ONT: Optical Network Terminal) cercanos a los usuarios finales. La parte ubicada entre la OLT y la ONT recibe el nombre de red de distribución óptica (ODN: Optical Distribution Network) [18].

^[2] **Backhaul:** Un enlace de backhaul es la conexión establecida entre una RAN y el núcleo de la red, transportando grandes cantidades de datos, voz y video procedentes de los usuarios conectados a las diferentes BBU's [12].

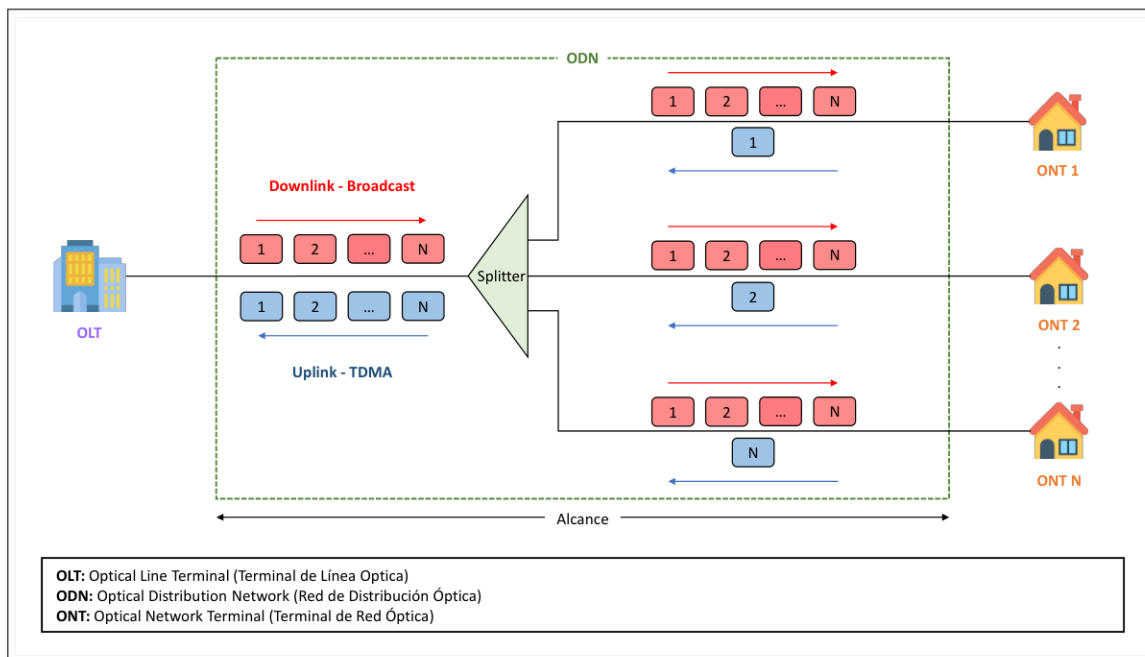


Figura 1.3: Topología de una red PON, basado en [19].

- ❑ **OLT:** Es un equipo que se encuentra ubicado en la oficina central, funciona como un dispositivo de hardware terminal y enlaza la PON con la red central. Controla la información que viaja en la ODN hacia las diferentes ONTs y es el encargado de realizar la conversión de señales eléctricas provenientes del proveedor de servicios en señales ópticas bajo una cierta longitud de onda y velocidad requeridas [19].
- ❑ **ODN:** Es una parte esencial en el sistema PON, ya que conecta físicamente la OLT con la ONT, alcanzando distancias de más de 20 km. Se compone principalmente de divisores o splitters, además de acopladores de multiplexación por división de longitud de onda (WDM: Wavelength Division Multiplexing). Tiene como principal característica el no requerir de ninguna fuente de alimentación externa ya que utiliza elementos pasivos. Su diseño es crítico debido a que afecta de forma directa a la funcionalidad, confiabilidad, escalabilidad y rendimiento de una PON [19].
- ❑ **ONT:** La ONT es un término utilizado por la Unión Internacional de Telecomunicaciones sección Telecomunicaciones (UIT-T) para referirse al equipo terminal que se coloca dentro de las instalaciones del cliente, finalizando la línea de fibra óptica procedente de la OLT. Esta señal óptica se convierte en eléctrica y se descompone en servicios de Internet, televisión y teléfono. El equivalente de la ONT en la IEEE (IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers) es la unidad de red óptica (ONU: Optical Network Unit), el cual realiza las mismas funciones [19].

Las PON constituyen una familia de redes xPON cuyo origen se remonta a una red inicial definida por las redes de acceso a servicios completos (FSAN: Full Services Access Networks), la cual es una iniciativa internacional que tiene como objetivo unificar las especificaciones para el acceso de banda ancha a hogares [18]. En la Tabla 1.1 se presenta una comparativa de los estándares PON.

Tabla 1.1: Comparativa de las tecnologías PON, basado en [18][19][20].

Características	APON	BPON	EPON	GPON	XG-PON	XGS-PON	NGPON-2
Nombre	ATM PON	Broadband PON	Ethernet PON	Gigabit PON	10 Gigabit PON	10 Gigabit Sym-metric PON	New Generation PON 2
Estándar	ITU-T G.983	ITU-T G.983	IEEE 802.3ah	ITU-T G.984	ITU-T G.987	ITU-T G.987	ITU-T G.989
Velocidad de subida	155 Mbps	155 Mbps	1.25 Gbps	1.244 Gbps	2.488 Gbps	10 Gbps	40 Gbps
Velocidad de bajada	155/622 Mbps	155/622 Mbps	1.25 Gbps	2.488 Gbps	10 Gbps	10 Gbps	40 Gbps
Tipo de fibra	Monomodo SMF ITU-T G.652	Monomodo SMF ITU-T G.652	Monomodo SMF ITU-T G.652	Monomodo SMF ITU-T G.652	Monomodo SMF ITU-T G.652	Monomodo SMF ITU-T G.652	Monomodo SMF ITU-T G.652
Longitudes de onda	Bajada: 1490 nm Subida: 1310 nm Video: 1550 nm	Bajada: 1490 nm Subida: 1310 nm Video: 1550 nm	Bajada: 1490 nm Subida: 1310 nm Video: 1550 nm	Bajada: 1490 nm Subida: 1310 nm Video: 1550 nm	Bajada: 1577 nm Subida: 1270 nm Video: 1550 nm	Bajada: 1578 nm Subida: 1270 nm Video: -	Bajada: 1600 nm Subida: 1535 nm Video: -
Máximo radio de divisiones por ONT	1:32	1:32	1:128	1:128	1:256	1:256	1:256
Alcance máximo entre OLT y ONT	-	20 km	20 km	20 km	40 km	40 km	60 km
Tecnología	Usa celdas ATM	Distribución dinámica del ancho de banda	Usa tramas IEEE 802.3ah para subida y bajada	Multiplexación por división de tiempo (TDM)	Acceso por TDM (TDMA) para subida y TDM para bajada	Acceso por TDM (TDMA) para subida y TDM para bajada	Multiplexación por división de tiempo y longitud de onda (TWDM)
Arquitectura de transmisión	Simétrica y asimétrica	Simétrica y asimétrica	Simétrica	Simétrica y asimétrica	Simétrica y asimétrica	Simétrica	Simétrica

1.4.3.1 Ventajas

Una PON admite distancias más largas entre las oficinas centrales y las instalaciones del cliente en comparación con tecnologías como la línea de suscriptor digital (DSL: Digital Subscriber Line), la cual alcanza aproximadamente 5.5 km. Además, se puede asignar cada fuente de información a una longitud de onda diferente con WDM, evitando la mezcla de señales y facilitando la difusión desde la OLT a las diferentes ONTs brindando escalabilidad al sistema de transmisión [18].

Los sistemas basados en arquitecturas PON permiten un alto ancho de banda, pudiendo alcanzar tasas de hasta 10 Gbps para el usuario, esto se considera esencial para la transmisión de videos en alta definición y servicios bajo demanda. El uso de elementos pasivos (por ejemplo: splitters), junto con la configuración específica de estrella o árbol, implica un menor costo de implementación. Esto también reduce el costo de instalación de elementos activos, ya que son relativamente pocos, y de esta forma se evita gastos en la colocación y el mantenimiento de las alimentaciones de red [18].

1.4.3.2 Desventajas

Entre las desventajas de una PON, se destaca la reducción en la eficiencia de la red debido a la distribución de información a múltiples ONTs a través de un divisor. Además, se señala que la PON opera a una velocidad preestablecida, lo que podría generar desafíos al proporcionar velocidades diferentes a los clientes. La cuestión de la seguridad también es una desventaja, destacando la vulnerabilidad de la PON al espionaje de red y sabotaje externo. El hecho de que toda la información fluya a través del mismo canal físico aumenta la probabilidad de pérdida de seguridad [18].

Otro punto crítico es la dependencia de un solo OLT para un árbol de distribución. En caso de una falla en el OLT, todos los ONTs y divisores conectados a él se ven afectados, lo que podría tener un impacto significativo en la red. Sin embargo, la instalación de menos OLTs puede reducir los costos de implementación de la red, aunque esto conlleva el riesgo de una mayor vulnerabilidad en caso de falla. La sensibilidad de los ONTs, (por ejemplo: -28 dBm en una GPON de clase B+), es susceptible a las caídas de nivel de potencia, lo cual está directamente relacionado con la capacidad de los divisores y la distancia máxima que puede cubrir la red [18].

1.4.4 FORMA DE ONDA UFMC

UFMC es una generalización de las formas de onda OFDM y FBMC, el cual utiliza un filtro prototipo que permite disminuir la emisión fuera de banda (OoB: Out of Band) del espectro. El OoB puede reducirse al no utilizar algunas subportadoras localizadas al borde de la banda. En el sistema UFMC se asignan grupos de subportadoras para reducir la longitud del filtro y obtener una respuesta al impulso más corta, lo que se traduce en una mejor localización en el tiempo [8]. Además, es muy adaptable a múltiples entornos de transmisión donde se puede producir interferencia, retardo y dispersión Doppler, el cual es un efecto producido por el movimiento entre el emisor y el receptor. Esto es posible gracias a que la duración de los símbolos es igual, a pesar de que los usuarios pueden usar distintas longitudes de filtro y puntos de la FFT [21].

UFMC prescinde de un CP para combatir la dispersión temporal de un canal con multitraectorias, así se elimina el ISI y el ICI. Sin embargo, existe un incremento en la complejidad del procesamiento de la forma de onda tanto en el transmisor como en el receptor [8]. El uso de un filtro por cada subbanda permite que el ancho de banda se incremente, mejorando también la eficiencia en las comunicaciones cortas de tipo ráfaga. Es importante destacar que la longitud del filtro depende exclusivamente del ancho de banda asignado a cada subbanda. Dado que UFMC parte de OFDM, se presenta ortogonalidad lo que permite el uso de técnicas de modulación que resulten en símbolos complejos, por ejemplo QAM [22].

Entre las principales ventajas del uso de UFMC se encuentran la gran flexibilidad en el filtro de cada sub-banda, la cual se compone de una determinada cantidad de sub-portadoras adyacentes y de esta forma utiliza fragmentos del espectro para enviar datos muy cortos [9]. Comparado con FBMC y OFDM, el rendimiento que presenta UFMC es mucho mejor dado que se adapta a los requerimientos del usuario, lo cual es posible debido al ajuste de los filtros de cada sub-banda [23]. UFMC presenta una corta respuesta al impulso, lo que aumenta la eficiencia en el caso de servicios que requieran una baja latencia, lo que lo hace apto para las redes móviles 5G. También se reduce al mínimo el ICI dado que no es afectado sustancialmente por la velocidad del usuario (dispersión Doppler) [13].

UFMC presenta ciertas desventajas, entre las que destaca la complejidad del transmisor y receptor ocasionada por la cantidad de puntos de la FFT. Esto debido a que se extiende el cálculo de las series matemáticas que contienen datos acerca de la señal como su amplitud y fase [22]. Al presentarse entornos con desvanecimiento de canal, UFMC pierde parcial-

mente la ortogonalidad lo que afecta a los servicios que requieren manejar altas velocidad de transmisión, superior a los 10 Gbps. Además, cuando se presentan variaciones temporales, se afecta el sistema de transmisión debido a la alta sensibilidad de UFMC lo que lo limita en entornos de alta sincronización temporal [24]. En la Figura 1.4 se presenta el esquema de un sistema UFMC representado por diagramas de bloques tanto para transmisor como para receptor.

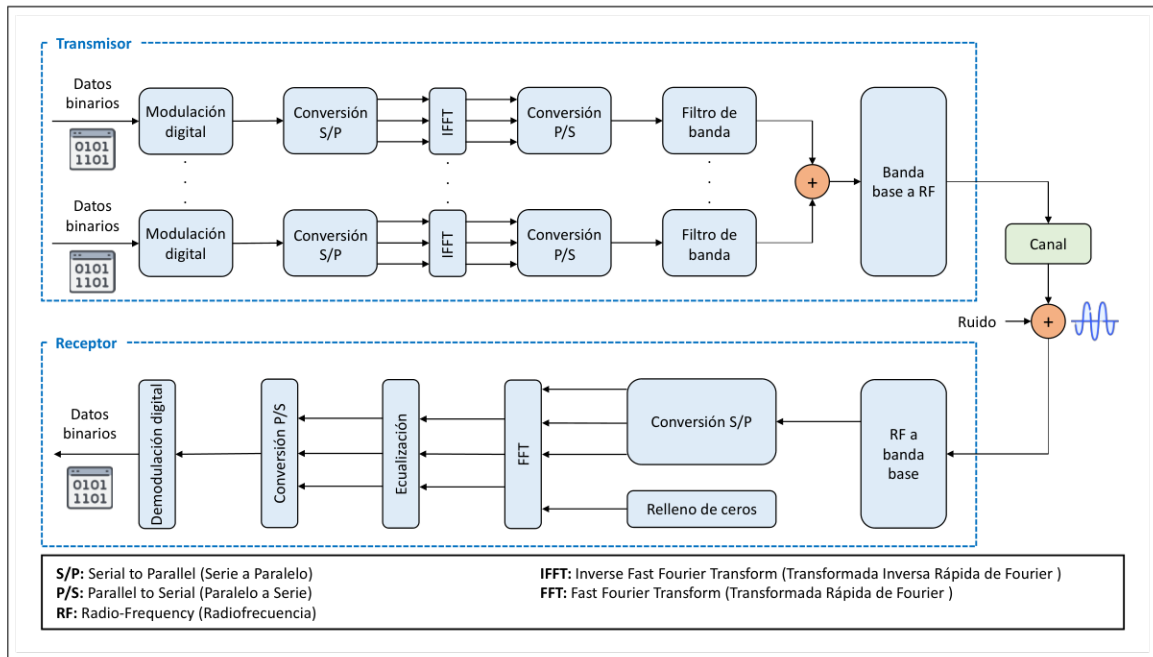


Figura 1.4: Diagrama de bloques de un sistema UFMC, basado en [8].

1.4.4.1 Transmisor

En la parte del transmisor UFMC, ingresa una secuencia de símbolos modulados por cada subbanda, que a su vez son procesados y luego filtrados. Las secuencias son sumadas antes de ser moduladas en RF y transmitidas por el medio óptico [8][13]. A continuación, se describen brevemente los componentes representados en la Figura 1.4.

- ❑ **Modulación Digital:** Cada uno de los flujos de bits que son generados por los usuarios son modulados digitalmente, por ejemplo utilizando modulación QAM, la cual es una técnica que codifica los datos en amplitud y cuadratura. Es decir, en esta modulación participan dos señales portadoras de una misma frecuencia pero desfasadas 90 grados [25]. El número de sub-bandas influye directamente en la carga computacional y en la complejidad del transmisor, lo cual puede ser hasta 10 veces más en tiempo de procesamiento de lo que se trabaja en OFDM [26].

- ❑ **Conversión Serie a Paralelo:** Mediante este proceso se transforma una señal continua que viaja por un canal en múltiples canales o flujos, lo cual puede ser visto como una multiplexación debido a que se puede transmitir más datos por medio del mismo canal [27]. Este es un paso fundamental previo a la IFFT ya que se reduce el tiempo de cálculo y la carga computacional [28].
- ❑ **Transformada Rápida Inversa de Fourier:** Es un algoritmo matemático que sirve para calcular la transformada inversa de Fourier de una señal discreta, llevándola del dominio de la frecuencia al dominio del tiempo [28]. Como entrada la transformada recibe números complejos, tomando en cuenta que el número de puntos debe ser una potencia de 2 [29]. Con esta operación se asegura de que no se generen interferencias entre sub-portadoras adyacentes [30].
- ❑ **Conversión Paralelo a Serie:** Es un proceso que transforma los flujos paralelos de una señal en uno solo, con el objetivo de favorecer su envío por medio del canal y permitiéndole adaptarse a los parámetros de transmisión. Su efecto es similar al de un multiplexor [27].
- ❑ **Filtro Dolph-Chebyshev:** Es un tipo de filtro que ofrece una respuesta en frecuencia con caídas más pronunciadas en las componentes fuera de banda, es decir, que los lóbulos secundarios de potencia son considerablemente reducidos. Posee dos parámetros de configuración: la atenuación de los lóbulos secundarios, también llamado factor de roll-off, y la longitud del filtro [31]. Para cada sub-banda se emplea filtros configurados tanto en longitud como en nivel de atenuación, dependiendo del servicio solicitado. El flujo resultante de cada sub-banda posee una dimensión dada por el número de puntos de la IFFT y la longitud del filtro, por lo que al sumar con los flujos resultantes de las demás sub-bandas, se genera la señal UFMC [32].

1.4.4.2 Receptor

En el receptor, se realiza un relleno de ceros y el flujo pasa por un bloque de procesamiento de FFT, luego se realiza un proceso de ecualización^[3] y finalmente se obtiene los símbolos

^[3] **Ecualización:** Es un proceso que permite ajustar el espectro de frecuencias de una señal, ya sea aumentando o disminuyendo la potencia de una frecuencia o rango de frecuencias [8].

que serán demodulados digitalmente [8]. A continuación, se describe brevemente los componentes representados en la Figura 1.4. El proceso de conversión de serie a paralelo, y viceversa, es el mismo que en el transmisor.

- ❑ **Relleno de Ceros:** Es un proceso cuyo objetivo es implementar una banda de guarda y compensar los efectos del filtro utilizado en la transmisión. El relleno de ceros (ZP: Zero Padding) permite utilizar adecuadamente la FFT dado que la longitud del flujo es igual a los puntos de la IFFT (N) más la longitud del filtro (L) [33]. Es decir, al agregar un ZP, se garantiza el funcionamiento de la FFT con una longitud igual a $2N$ [32].
- ❑ **Transformada Rápida de Fourier:** La FFT es el algoritmo inverso a la IFFT, es decir, lleva una señal discreta del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia. Se debe considerar que la ventana de trabajo es el doble de lo trabajado en transmisión, por lo que se obtiene como resultado un flujo de N símbolos complejos [13].
- ❑ **Ecuación de Banda:** Tiene la finalidad de equilibrar el efecto causado por los filtros de las sub-bandas y del canal. Se utiliza un tipo de filtro inverso al usado en la transmisión con el fin de revertir la distorsión mejorando la calidad de la señal [34].
- ❑ **Demodulación Digital:** Es el paso final donde se extrae las secuencias binarias originales a partir de los símbolos filtrados y ecualizados anteriormente. En el caso de QAM, implica la multiplicación de la señal por una función seno o coseno. De esta forma se puede comparar los bits enviados y recibidos para calcular el BER [24].

1.4.5 FORMA DE ONDA GFDM

GFDM es una forma de onda no-ortogonal que se ha propuesto para las redes 5G. La generación de esta nueva forma de onda se basa en reemplazar la convolución lineal por un pulso conformador^[4] con convolución circular. Al hacer uso de la convolución circular, el sistema en general puede mantener un procesamiento por bloques de manera que sea fácil introducir un prefijo cíclico. La forma de GFDM permite tener flexibilidad al elegir la modulación de los símbolos y el diseño del pulso conformador. Sin embargo, la no-ortogonalidad implica el requerimiento de un receptor avanzado que permita cancelar el ISI y el ICI producto de la misma no-ortogonalidad presente en las sub-portadoras [8].

^[4] **Pulso conformador:** Es un filtro de tipo pasa bajo que elimina componentes altas de frecuencia y da forma a la señal transmitida. Así se minimiza el ancho de banda y se limita el ISI. Algunos ejemplos son los pulsos de Nyquist y los pulsos de coseno levantado [35].

Cada bloque contiene MK símbolos que se transmiten utilizando M ranuras de tiempo y K supportadoras. Cada símbolo se modula con un pulso conformador obtenido de un filtro prototipo apropiadamente desplazado en tiempo y frecuencia. Este proceso de modulación permite que GFDM tenga una flexibilidad para satisfacer la mayoría de los escenarios definidos para la 5G, ya que es posible modificar los parámetros del sistema para crear distintas estructuras tiempo-frecuencia. A pesar de su no-ortogonalidad, GFDM presenta ventajas significativas en cuanto a flexibilidad y eficiencia espectral en comparación con otras formas de onda multiportadora como OFDM [8].

Como principal ventaja de GFDM se encuentra la mejora en la tasa de transmisión con respecto a OFDM debido a la optimización de ancho de banda. Además, se tiene mejora en la eficiencia energética dado que la potencia no se distribuye uniformemente entre las sub-portadoras haciéndolas adaptables [36]. Como consecuencia, se logra una mejor cobertura de señal, llegando a zonas más amplias con una conectividad más estable y rápida, brindando velocidades superiores a 10 Gbps [37]. Al transmitir la información por varias sub-portadoras, se reduce la interferencia entre las mismas (ICI) mejorando también la eficiencia espectral entre un 10 a 20 % [38]. Entre las desventajas que posee GFDM destaca la complejidad en la implementación ya que utiliza mayor cantidad de filtros y operaciones matemáticas [38]. Esto resulta también en un mayor retardo en la transmisión, lo que afecta a la calidad de la señales y lo limita al manejar altas cargas de tráfico [39]. En la Figura 1.5 se presenta el esquema de un sistema GFDM representado por diagramas de bloques tanto para el transmisor como para el receptor.

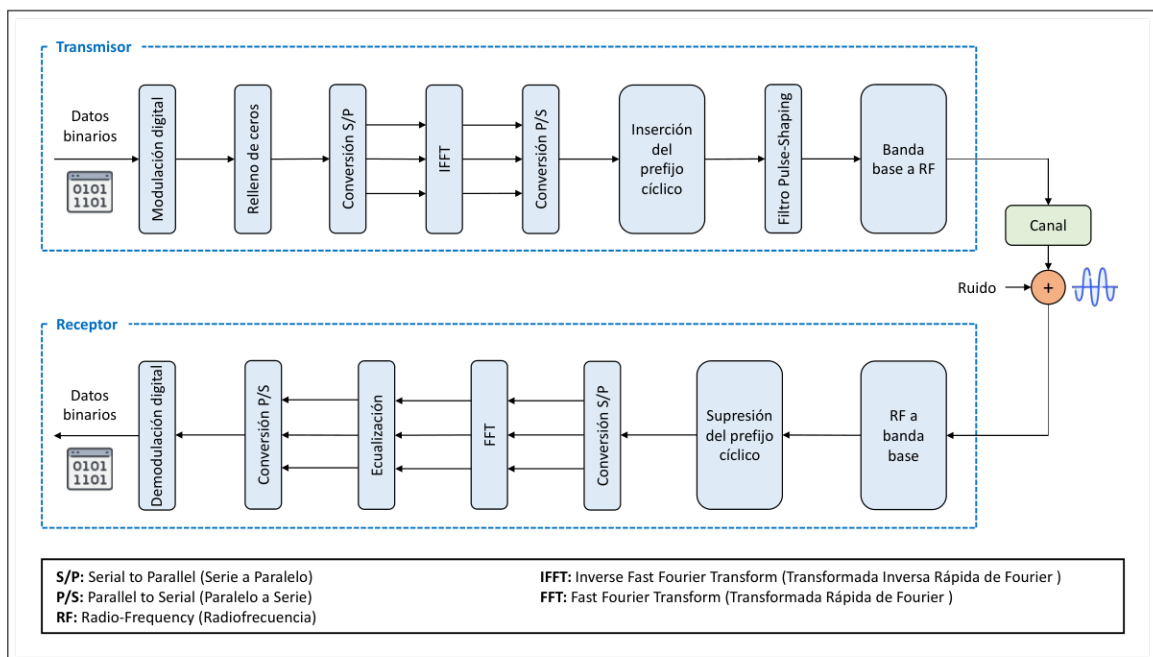


Figura 1.5: Diagrama de bloques de un sistema GFDM, basado en [8].

1.4.5.1 Transmisor

En la parte del transmisor GFDM, ingresa una secuencia de símbolos modulados, el cual se rellena con ceros y pasa por la IFFT. Se inserta el CP y se filtra antes de ser transmitidas por el medio óptico [8]. A continuación, se describe brevemente los componentes representados en la Figura 1.5.

- ❑ **Modulación Digital:** Los usuarios generan flujos de bits que son modulados digitalmente. Para este caso se utiliza modulación QAM, que codifica los datos en amplitud y cuadratura. En esta técnica, dos señales portadoras de la misma frecuencia participan, pero están desfasadas 90 grados [25].
- ❑ **Relleno de ceros:** Cuando los datos son modulados en múltiples sub-portadoras, la duración es generalmente menos a la de un símbolo completo, lo que ocasiona baja eficiencia espectral. Con el relleno de ceros, cada fragmento de datos tiene una duración igual a la de un símbolo GFDM, elevando la eficiencia espectral y por lo tanto, la calidad de la transmisión [27].
- ❑ **Conversión Serie a Paralelo:** Este proceso transforma una señal continua que viaja por un canal en múltiples canales o flujos. Esto puede considerarse como una forma de multiplexación, ya que permite transmitir más datos a través del mismo canal [27].
- ❑ **Transformada Rápida Inversa de Fourier:** Es un algoritmo matemático utilizado para calcular la IFFT de una señal discreta, lo que implica llevar la señal del dominio de la frecuencia al dominio del tiempo [27]. Requiere números complejos como entrada, con la condición de que el número de puntos sea una potencia de 2 [28].
- ❑ **Conversión Paralelo a Serie:** Es un proceso que combina múltiples flujos paralelos de una señal en uno solo, con el propósito de facilitar su envío a través del canal y permitirle ajustarse a los parámetros de transmisión [27].
- ❑ **Inserción del prefijo cíclico:** El CP es una copia del símbolo GFDM que es insertado al inicio y sirve como intervalo de guarda entre los demás símbolos. El propósito de aumentar el CP es mitigar el ISI y el ICI ocasionadas por la dispersión de retardo en un entorno multitrayecto [8].
- ❑ **Filtro Pulse-Shaping:** Es un componente que mejora la calidad de la señal y la prepara para atravesar el canal. Mediante este filtro se da forma a los pulsos, los cuales

se ajustan a los requerimientos específicos con el fin de minimizar las interferencias [40].

1.4.5.2 Receptor

En el receptor, se realiza la supresión del CP y el flujo pasa por un bloque de procesamiento de FFT, luego se realiza un proceso de ecualización y se obtienen los símbolos que serán demodulados digitalmente [8]. A continuación, se describen brevemente los componentes representados en la Figura 1.5. El proceso de conversión de serie a paralelo, y viceversa, es el mismo que en el transmisor.

- ❑ **Supresión del Prefijo Cíclico:** En este paso se extrae la copia del símbolo GFDM y se sincroniza la señal, todo esto con el fin de procesarla y después recuperar los datos [8].
- ❑ **Transformada Rápida de Fourier:** Es el algoritmo inverso a la IFFT, lo que significa que convierte una señal discreta del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia. Se debe tener en cuenta que la ventana de trabajo es el doble de lo utilizado en la transmisión, lo que resulta en un flujo de N símbolos complejos como resultado [13].
- ❑ **Ecualización:** Con este proceso se pretende compensar las distorsiones que ha sufrido la señal durante la transmisión. Estas distorsiones pueden ser causadas por el ruido, la atenuación, la dispersión espectral, etc. La ecualización en GFDM es aplicada a cada una de las sub-portadoras [41].
- ❑ **Demodulación Digital:** Es el último paso en el cual se recuperan las secuencias binarias originales a partir de los símbolos previamente filtrados y ecualizados. En el caso de la modulación QAM, esto implica la multiplicación de la señal por una función seno o coseno [24].

2 METODOLOGÍA

El presente capítulo describe el proceso y la metodología empleados para la generación de las formas de onda UFMC y GFDM, así como la implementación del sistema de comunicación RoF mediante un canal óptico físico. Se trabaja con el software Matlab en su versión 2023b para la generación de las señales UFMC y GFDM, y su posterior procesamiento. En el sistema RoF se emplea el uso de elementos de una PON, como el láser óptico y el fotodiodo. Para integrar estos dos ambientes, se hace uso de un generador arbitrario de formas de onda (AWG: Arbitrary Waveform Generator) para la transmisión y de un analizador digital de señales (DSA: Digital Signal Analyzer) para la recepción.

La forma de trabajo en que los ambientes de generación de formas de onda y de implementación interactúan se representa en la Figura 2.1. El primer bloque hace referencia a la etapa de transmisión de cada sistema. Para la correcta generación de las señales UFMC y GFDM, se deben realizar las configuraciones de los parámetros como el esquema de modulación, el número de bloques y el número de sub-portadoras. Además, se realizan otras operaciones como la generación de la señal de sincronismo, lo cual ayudará a la posterior transmisión de los datos.

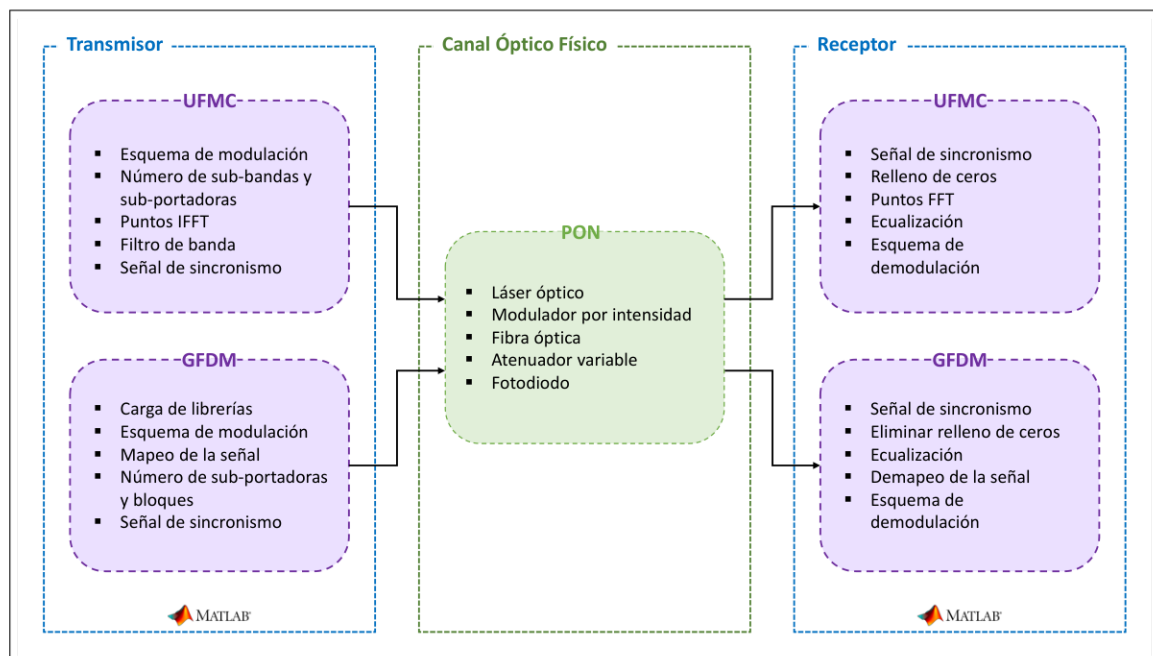


Figura 2.1: Diagrama de implementación de los sistemas UFMC y GFDM, basado en [42][43].

El segundo bloque muestra la forma de implementación física del canal óptico, donde entran las señales UFMC y GFDM de manera separada hacia una PON. Para este paso, el AWG

toma la señal generada en Matlab y la modula en una señal de RF, para que en conjunto con un modulador de intensidad y un láser óptico, se convierta en una señal óptica. Esta señal atraviesa la red de fibra óptica y un atenuador variable para regular su potencia antes de ingresar a un fotodetector, donde se convierte en una señal eléctrica. El tercer bloque muestra la recepción de las señales UFMC y GFDM que atraviesan el canal óptico. En este punto se retira la señal de sincronismo y se la prepara para su procesamiento. Se realiza la demodulación de los símbolos con el fin de calcular el BER y el EVM, además de obtener los diagramas de constelaciones para cada orden de modulación.

2.1 ANÁLISIS DE REQUERIMIENTOS

La tecnología RoF aprovecha los beneficios de la fibra óptica para superar las limitaciones de las redes de comunicaciones inalámbricas, lo que hace posible transmitir a más altas velocidades entre BSes y a su vez brindar una mejor experiencia al usuario en cuanto a nuevas funcionalidades. Con el fin de garantizar una implementación de enlace físico lo más próximo a una red 5G bajo RoF, se trabaja con una red de acceso de radio de siguiente generación (NG-RAN: Next Generation Radio Access Network) [44].

Al utilizar la fibra óptica como medio para transmitir una señal RF, se disminuye la atenuación de la misma, así como permite una mayor distancia de enlace debido a que no sufre interferencias electromagnéticas, lo cual es una gran ventaja frente a entornos inalámbricos [37]. Con la integración de las redes 5G, la tecnología RoF permite el transporte de señales a alta velocidad, con una mayor capacidad y cobertura, mejorando la calidad de servicio a los usuarios. Para garantizar un correcto funcionamiento del enlace RoF, se debe considerar el tipo de fibra óptica a utilizarse ya que se manejan parámetros importantes como la atenuación y distancia de transmisión [45].

La atenuación en la fibra óptica es el decremento de potencia de la señal mientras atraviesa el canal, y es causada principalmente por la dispersión y absorción de la luz por el propio material de la fibra. Esta disminución es un valor medido en decibelios por kilómetro [dB/km] y depende de la ventana de transmisión. La atenuación de señal óptica y la distancia del enlace están estrechamente relacionadas, pues mientras mayor sea la distancia de transmisión, el valor de la atenuación también aumenta. En el caso de una fibra SMF, el valor de atenuación típico es de 0.2 dB/km con una longitud de onda de 1550 nm [46]. En la Figura 2.2 se presentan las curvas de atenuación y dispersión en las bandas O, E, S, C y L de fibra óptica de acuerdo con el estándar G.652.

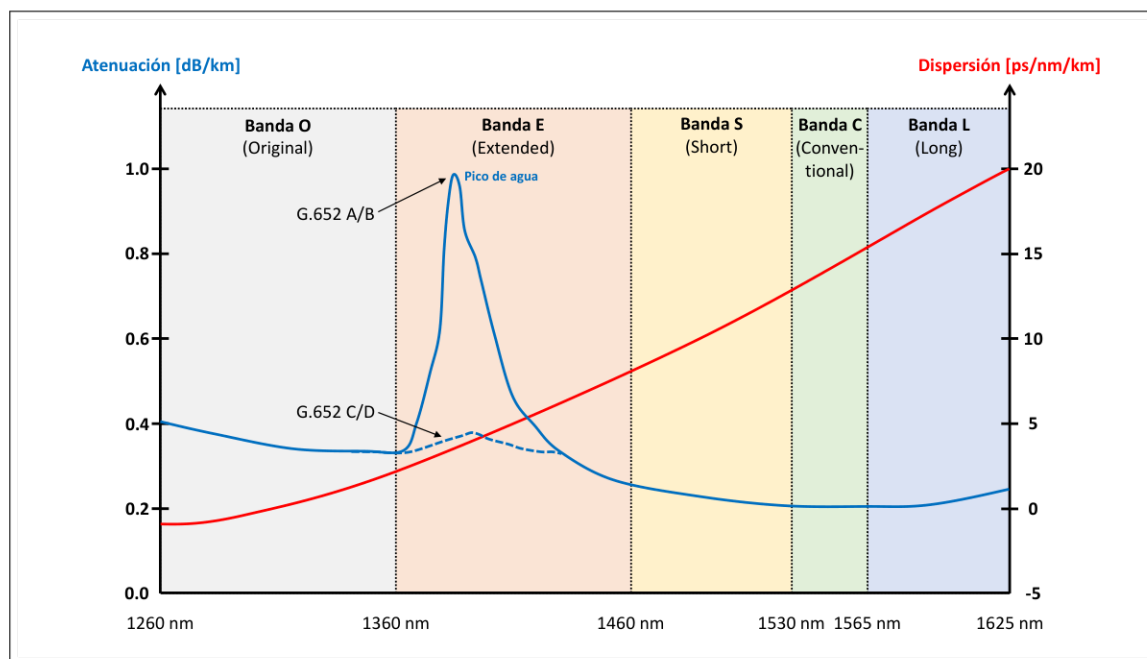


Figura 2.2: Atenuación y dispersión en las bandas de fibra óptica, basado en [46].

En la implementación física se utiliza la fibra SMF especificada en el estándar G.652 de la UIT-T. Este tipo de fibra es muy utilizada en las redes PON debido a su alta calidad y bajo costo. El diámetro de núcleo es de 8 a 10 μm y el diámetro del revestimiento es de 125 μm . Trabaja en las longitudes de onda entre 1260 a 1625 nm, con una atenuación típica de 0.2 dB/km a 1550 nm. El ancho de banda modal efectivo supera los 100 MHz km con 1310 y 1550 nm [47]. La fibra SMF de la recomendación G.652D es útil en enlaces de larga distancia y de alta velocidad debido a su baja atenuación y dispersión. Sin embargo, tiene ciertas limitaciones en relación a la longitud máxima de enlace [46].

2.2 HERRAMIENTAS DE SOFTWARE

2.2.1 MATLAB

Matlab es un programa informático creado por la corporación MathWorks en 1984, el cual permite realizar cálculos, modelos y algoritmos matemáticos mediante la utilización de matrices. Este software es ampliamente utilizado en ingeniería y matemáticas principalmente para el procesamiento de señales y el análisis de datos. Dichas tareas son realizadas mediante un lenguaje de programación de alto nivel, el mismo que permite expresar ideas científicas y matemáticas junto a las diferentes estructuras de programación con una sintaxis concisa y clara. Matlab también permite la interacción con herramientas adicionales llamadas Toolbox que permiten integrar funciones de estadística, optimización, análisis de señales, aprendizaje automático, entre otros [48].

Para implementar el sistema RoF, se emplea Matlab para conformar el conjunto de bloques tanto en el transmisor para la generación de señales UFMC y GFDM, como en el receptor para su posterior procesamiento, tal como se muestra en la Figura 2.1. El uso del Communications Toolbox facilita la utilización de funciones para la modulación y demodulación de señales mediante técnicas como QAM. Además, con las funciones propias de Matlab se pueden realizar operaciones matemáticas como la FFT y la IFFT, así como la descomposición de vectores de datos en parte real e imaginaria, y la creación de la señal de sincronización mediante la función XOR, entre otras operaciones. Para el análisis de resultados, se aplican scripts para el cálculo del BER y del EVM, así como para obtener la densidad espectral de potencia (PSD: Power Spectral Density).

2.2.2 AGILENT CONTROL UTILITY

Agilent Technologies es una compañía de software e instrumentación de laboratorio creada en 1999 y derivada de Hewlett-Packard. En 2013, se separó en dos empresas: Agilent para las ciencias biológicas y médicas, y Keysight Technologies para la fabricación de equipos de medición electrónica [49]. Los productos de software de Agilent Technologies permiten la integración de instrumentos, aplicaciones y datos en una sola arquitectura para la obtención de datos y control en laboratorio, entre las cuales se encuentra Agilent Control Utility [50]. Este programa permite tomar la forma de onda generada por Matlab y colocarla en el generador arbitrario de señales, de esta forma se convierte la señal de datos a una señal de RF la cual atraviesa el canal óptico.

2.3 TRANSMISIÓN DE DATOS

El sistema de transmisión de datos para las formas de onda UFMC y GFDM se representa en diagramas de bloques en la Figura 2.3, donde se describe el proceso de transmisión y recepción llevados a cabo en Matlab, así como el paso por el canal óptico realizado de forma física. En la transmisión de datos, se define la configuración de parámetros para generar las formas de onda antes de enviarlas al AWG. Para ambos casos se procura mantener los mismos parámetros, ya que cada uno utiliza codificaciones y funciones diferentes. La técnica de modulación aplicada es QAM y la señal de sincronismo se genera de forma similar para las dos formas de onda.

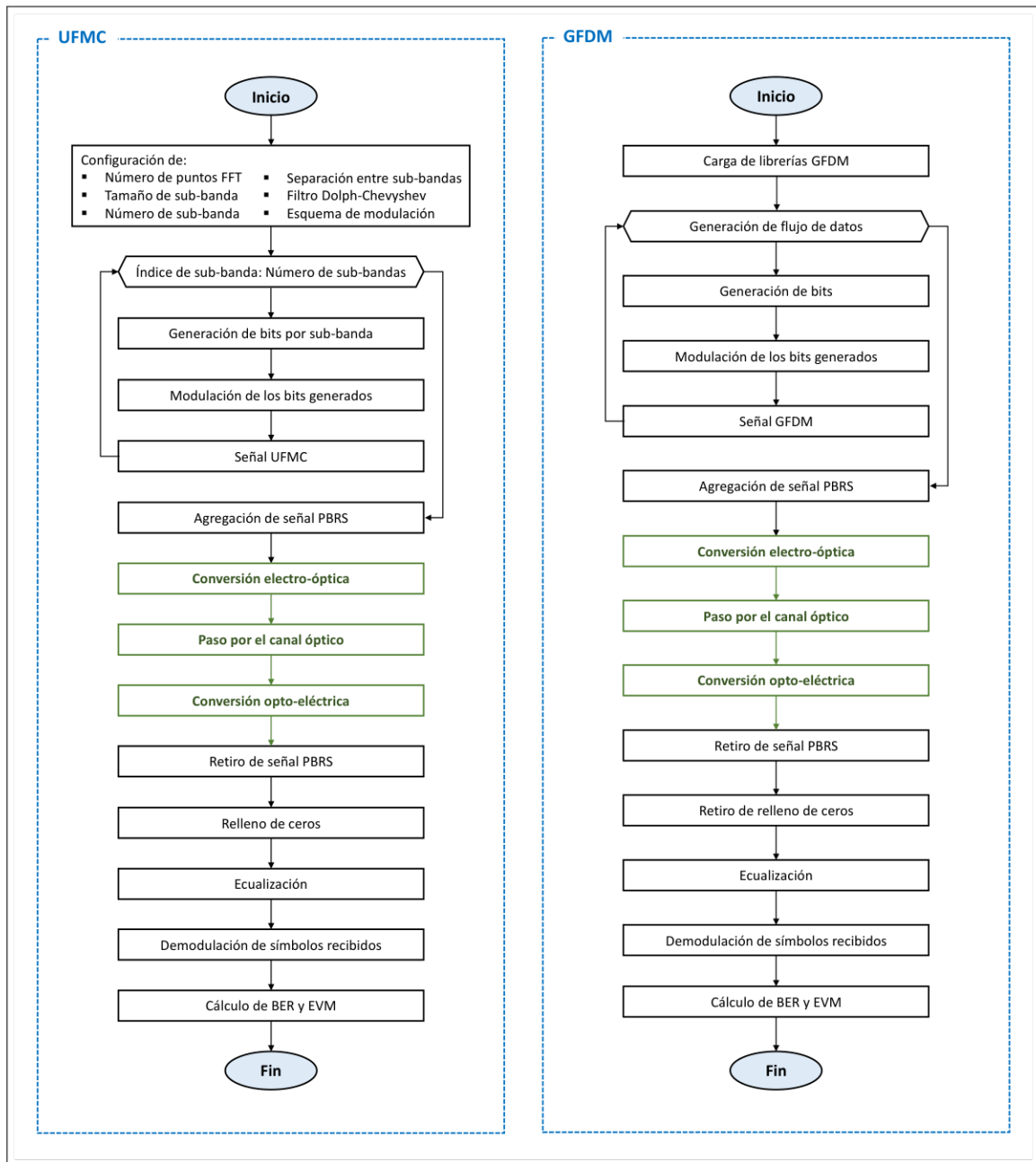


Figura 2.3: Diagramas de flujo de los sistemas UFMC y GFDM, basado en [42][43].

Dentro de esta sección se explica brevemente la generación de las formas de onda UFMC y GFDM, describiendo los segmentos de código más importantes y los parámetros principales a utilizarse.

2.3.1 TRANSMISOR UFMC

2.3.1.1 Selección de parámetros

Para la generación de la forma de onda UFMC se toma en cuenta el rango de parámetros presentado en la Tabla 2.1 con el fin de obtener un buen funcionamiento en el sistema RoF,

ya que se maneja una tasa de transferencia de 10 Gbps aproximadamente. Este parámetro de velocidad va conforme el contexto de una red XGS-PON dado que puede dar soporte a varios servicios y aplicaciones en las redes móviles 5G.

Tabla 2.1: Parámetros de configuración para generar la señal UFMC, tomado de [42].

Parámetro	Valor
Número de puntos FFT	$2^{14} - 2^{24}$
Tamaño de sub-banda	50 - 150
Cantidad de sub-bandas	80 - 150
Longitud del filtro	35 - 55 muestras
Atenuación del lóbulo lateral	40 - 60 dB
Esquema de modulación	4/16/64/256 QAM

2.3.1.2 Generación de flujo de datos

El flujo de bits es una secuencia de unos (1) y ceros (0) obtenidos de forma aleatoria, ya que simulan ser los datos transmitidos por los usuarios en conjunto con los empaquetamientos de los distintos protocolos de comunicación. Mediante Matlab se genera el flujo de bits a través de la función `randi` para obtener aleatoriamente números enteros dentro de un rango definido con una distribución uniforme [51]. El Código 2.1 indica la sintaxis para generar la secuencia aleatoria de bits.

```
FlujoBits = randi([0 1]) , B*T , 1)
```

Código 2.1: Generación de la secuencia aleatoria de bits.

De esta forma, el rango de números es del cero al uno para obtener los bits. Para el tamaño del vector se toma en cuenta al producto de B, que es la cantidad de bits por cada sub-portadora en la modulación QAM, por T que es el tamaño de sub-banda. Este producto asegura que todo el vector binario sea modulado en QAM. Luego, como dimensión del vector generado se coloca 1 para obtener un vector columna de flujo.

2.3.1.3 Número de puntos FFT

Tal como se indica en la Tabla 2.1, el número de puntos de la FFT y IFFT puede ubicarse entre 2^{14} y 2^{24} puntos. Este valor no debe superar al producto entre el tamaño de las sub-bandas y el número de sub-bandas, por lo que tomando 100 sub-bandas de tamaño 100, el número de puntos es configurable en dicho rango, dependiendo solo del ancho de banda que se desea asignar. Cuando el número de puntos bordea la cantidad mínima se obtiene el máximo ancho de banda y viceversa, dado que a 2^{14} el ancho de banda alcanza los

10 GHz y con 2^{22} disminuye a 1.3 GHz. Además, la cantidad de puntos de la FFT influye directamente en la carga computacional y el tiempo de procesamiento de la señal [42].

2.3.1.4 Esquema de modulación

El esquema de modulación a utilizarse es M-QAM y se puede obtenerlo a través de la función `qammod`. El orden de modulación M está dado al elevar 2 a la cantidad de bits por sub-portadora. La entrada a esta función es el vector de bits, por lo que su longitud debe ser un múltiplo entero de $\log_2(M)$. De esta forma, el vector de símbolos modulados tomará valores entre 0 y $M-1$ [52].

2.3.1.5 Separación entre sub-bandas

Con el fin de mantener separadas las sub-bandas y garantizar un espacio de guarda, se genera un distanciamiento entre bandas mediante el Código 2.2, donde FFT es el número de puntos de la FFT, T es el tamaño de las sub-bandas y N es el número de sub-bandas [42].

```
SeparacionSubBandas = FFT/2 - T*N/2
```

Código 2.2: Cálculo de separación de sub-bandas.

2.3.1.6 Filtro de banda

Para generar un ventana de filtro Dolph-Chevyshev, se utiliza la función `chebwin`, tal como se muestra en el Código 2.3. Aquí se introducen dos parámetros: la longitud L de la ventana cuyo valor a utilizarse es de 43 muestras, y la atenuación A del lóbulo lateral, cuyo valor es de 50 dB. Esta ventana se desplaza por cada sub-banda para luego realizar una convolución entre los datos y el filtro a través de la función `conv` [42].

```
FiltroBanda = chebwin(L , A)
```

Código 2.3: Generación de la ventana de filtro.

2.3.1.7 Señal de sincronismo PBRS

La señal pseudoaleatoria binaria (PBRS: Pseudo-Random Binary Signal) es una secuencia digital compuesta de unos (1) y ceros (0), los cuales son aleatorios y pueden ser generados a través de álgebra booleana o registros de desplazamiento [53]. Dicha secuencia sirve como señal de sincronismo para determinar el punto de inicio de transmisión de datos.

La señal de sincronismo se genera mediante la función PBRs, donde se coloca dos parámetros: el vector de condiciones iniciales representado por la secuencia binaria [0 1 0 1 0 1 1] y el polinomio generador $x^7 + x^6 + 1$, el cual es de grado 7 para una señal de 128 bits de longitud [42]. Esta configuración se muestra en el Código 2.4.

```
SenalSincronismo = PBRs([0 1 0 1 0 1 1] , [7 6])
```

Código 2.4: Generación de la señal de sincronismo PBRs.

2.3.1.8 Preparación de la señal

Con el fin de que la señal pueda atravesar el canal óptico en un solo flujo, se debe separar la parte real y la parte imaginaria, y concatenarlas en un solo vector. Esto genera una señal de datos conformada por las partes real e imaginaria de la señal UFMC y por la señal de sincronismo, la cual previamente debe ser amplificada en un factor de 1.5 del valor máximo de la señal UFMC [42]. Este proceso se muestra en el Código 2.5.

```
ParteRealUFMC = real(senalUFMC)
ParteImagUFMC = imag(senalUFMC)
SenalSincronismo = SenalSincronismo * max(abs(SenalUFMC)) * 1.5
SenalTX = [SenalSincronismo ParteRealUFMC ParteImagUFMC]
```

Código 2.5: Preparación de la señal UFMC previo al paso por el canal óptico.

2.3.2 TRANSMISOR GFDM

2.3.2.1 Selección de parámetros

Para generar la forma de onda GFDM se utiliza la librería disponible del repositorio GitHub de Vodafone Chair Mobile Communications System, el cual posee funciones para la generación de la señal GFDM en varios lenguajes de programación [54]. En este caso se utiliza la librería de Matlab, donde se introducen los parámetros de configuración presentados en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2: Parámetros de configuración para generar la señal GFDM, tomado de [43].

Parámetro	Objeto	Valor
Número de subportadoras	gfdm.K	2^7
Asignación de subportadoras	gfdm.Kset	0 - 15
Función de pulso	gfdm.pulse	rrc_fd
Matiz a implementar los símbolos	gfdm.a	0.3
Datos de entrada de los símbolos	gfdm.Mon	400
Orden de modulación	gfdm.mu	4/16/64/256
Número de bloques GFDM generados	nB	1
Número de subportadoras superpuestas	gfdm.L	0
Número de subportadoras activas	gfdm.Kon	0
Modulación	gfdm.oQAM	1

2.3.2.2 Generación de flujo de datos

La creación del flujo de datos se realiza con un bucle, el cual itera hasta llegar al valor especificado por el parámetro nB. Con el Código 2.6 se genera los flujos aleatorios, donde `get_random_symbols` es una función para obtener símbolos aleatorios tomando en cuenta el esquema de modulación configurado, y `gfdm` es la cantidad de símbolos GFDM que se van a generar [43].

```
S = get_random_symbols(gfdm)
```

Código 2.6: Generación de la secuencia aleatoria de datos.

2.3.2.3 Esquema de modulación

Una vez obtenido el flujo de datos aleatorios `S`, se utiliza la función `do_qammodulate` para modular con la técnica M-QAM cuyo orden está dado por el valor de `gfdm.mu`. Luego se mapea la señal modulada con la función `do_map` para finalmente modular la señal mapeada con `do_modulate` y obtener la señal resultante `x` [43]. Este proceso se muestra en el Código 2.7.

```
A = do_qammodulate(S , gfdm.mu)
D = do_map(gfdm, A)
X = do_modulate(gfdm , D , 'F')
```

Código 2.7: Modulación del flujo de datos.

2.3.2.4 Separación de la señal

Mediante el Código 2.8 se obtiene la parte real e imaginaria de la señal GFDM `x` con el fin de favorecer el análisis y procesamiento de estos componentes de manera individual. La

parte real corresponde a la información y la parte imaginaria hace referencia a la fase de la señal.

```
ParteRealGFDM = real(X)
ParteImagGFDM = imag(X)
```

Código 2.8: Separación de la señal GFDM en parte real e imaginaria.

2.3.2.5 Señal de sincronismo PBRS

El proceso de generación de la señal PBRS para el sistema GFDM se realiza con registros de desplazamiento, con el polinomio generador y vector de condiciones iniciales iguales a las presentadas en el Código 2.4 [43].

2.3.2.6 Relleno de ceros

Los datos en la señal GFDM son agrupados en símbolos, los cuales poseen una duración específica. Si la duración de los datos no es múltiplo entero del período del símbolo, existe una porción de datos que no es ajustada en un símbolo entero. Dicho período se determina principalmente con la tasa de transmisión [36].

El relleno de ceros, presentado en el Código 2.9, asegura que se cumpla la condición de la duración del símbolo GFDM, haciendo que todos tengan la misma duración, y por lo tanto, la señal que se transmite tenga una estructura bien definida [43]. Aquí, se calcula la diferencia entre la longitud de la señal GFDM y el número de muestras relacionado con el período. Luego, a la señal de datos se concatena el vector de relleno de ceros.

```
Diferencia = Muestras - length(GFDM)
Diferencia = floor(Diferencia/2)
Relleno = zeros(1 , Diferencia)
GFDM = [Relleno GFDM Relleno]
```

Código 2.9: Relleno de ceros en la señal GFDM.

2.4 IMPLEMENTACIÓN DEL CANAL ÓPTICO

Una vez que se generan las señales UFMC y GFDM con el software Matlab, se procede a construir el canal óptico. Para esto se requiere de los equipos mostrados en la Tabla 2.3, donde se especifica la marca y el modelo de cada uno. Además, se necesita otros elementos pasivos para la interconexión y alimentación de equipos, los cuales se muestran en la Tabla 2.4.

Tabla 2.3: Equipos utilizados para el canal óptico.

Equipo	Marca / Modelo	Cantidad
Generador Arbitrario de Forma de Onda	Agilent N8241A	1
Láser de Onda Continua	IdPhotonics Mainframe CBMA24 & Module CoBrite MX	1
Fuente de Alimentación DC	KeySight EDU36311A	1
Modulador de Intensidad Óptica	Thorlabs LNA2124	1
Atenuador Variable	Gao-Voa-103	1
Analizador Digital de Señales	KeySight DSAV164A	1

Tabla 2.4: Materiales empleados para el canal óptico.

Material	Cantidad
Rollo de Fibra Óptica G.652D	1
Cable Coaxial con conectorización SMA macho	2
Patch Cord con conectorización FC/APC - FC/UPC	1
Unión FC/APC - FC/APC	1
Cable con pinza cocodrilo	2
Cable Ethernet categoría 6	2

En la Figura 2.4 se presenta el esquema de conexión de equipos y materiales, los cuales constituyen el sistema RoF sobre el que se transmite las señales UFMC y GFDM. En la parte de la ONT, se ubica el AWG el cual se carga con la forma de onda generada en Matlab a través del software Agilent Control Utility, y con ayuda de un cable de red conectado a la misma LAN en la que se encuentra la PC. También se coloca un láser de onda continua (CW: Continuous Wave) conectando la entrada del modulador de intensidad óptica al primer puerto mediante el conector FC/APC. Luego se conecta un cable coaxial al puerto SMA del canal 1 en un extremo y a la entrada de RF del modulador en el otro extremo. Adicional, se coloca una fuente de corriente continua para alimentar el modulador óptico con un voltaje de 3.2 V, para esto se utiliza los cable con pinza cocodrilo.

En la ODN se ubica un rollo de 20 km fibra óptica G.652D, el cual presenta en sus dos extremos conectores FC/APC. El primero se acopla a la salida del modulador óptico de tipo

Mach-Zehnder mediante la unión FC/APC y el segundo se inserta en un puerto del atenuador variable. El extremo FC/APC del patch cord de fibra óptica se conecta al otro puerto del atenuador y el extremo FC/UPC se inserta en el puerto de entrada del fotodetector PIN. Este marca el inicio de la OLT, donde se recibe y procesa la señal transmitida. Para esto, se conecta un extremo del cable coaxial al puerto SMA de salida del fotodetector y el otro extremo al puerto SMA de entrada del canal 1 en el DSA. La señal transmitida se puede observar en tiempo real en la pantalla del equipo, sin embargo, es necesario llevarla a la PC por lo que se conecta el DSA con un cable de red hacia la LAN con el fin de trasladar la señal en un archivo de texto y que pueda ser procesada por Matlab.

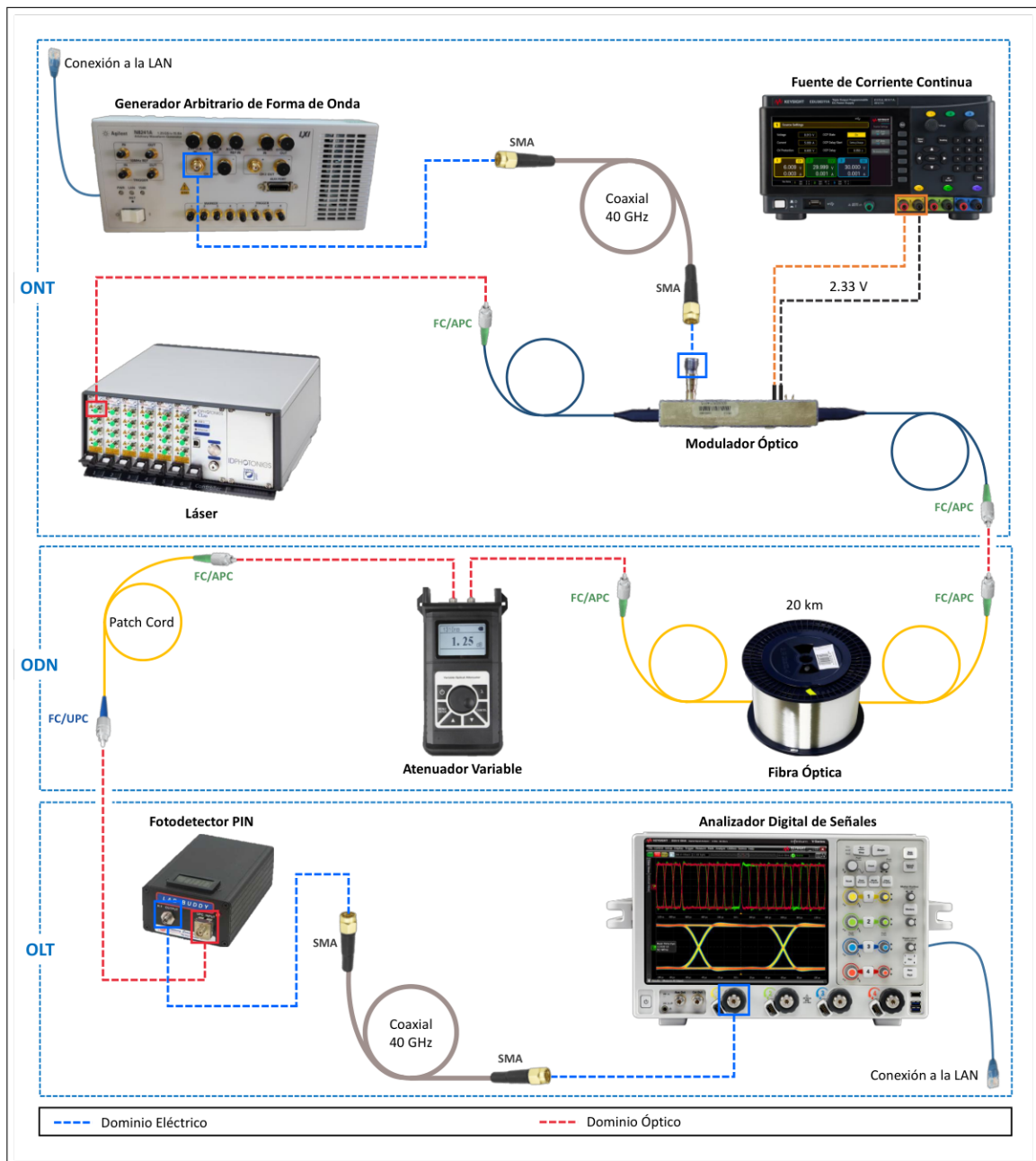


Figura 2.4: Esquema de conexión de equipos.

En esta sección se revisa brevemente las características principales y los parámetros de configuración de los diferentes equipos utilizados en la implementación del canal óptico.

2.4.1 GENERADOR ARBITRARIO DE FORMA DE ONDA

Un generador arbitrario de forma de onda (AWG) es un dispositivo que permite generar señales complejas de RF. El AWG que se emplea en la implementación es el Agilent N8241A, el cual permite crear formas de onda con una resolución de 15 bits. Permite manejar señales con 1.25 gigamuestras por segundo (GS/s) proporcionando formas de onda en banda ancha [55]. Presenta dos canales de salida balanceados e independientes con un ancho de banda de 500 MHz de modulación en RF [56]. En la Figura 2.5 se presentan sus principales características.



Figura 2.5: Características del AWG Agilent N8241A [55].

Este modelo de AWG incluye un paquete de software que le permite trabajar con Matlab, el cual se llama Control Utility. Mediante esta herramienta se puede configurar el equipo y realizar la transferencia de archivos que contengan la forma de onda [56]. Además, se puede configurar la ruta de acondicionamiento de señal, líneas de marcadores y activación, fuentes de reloj y referencias [55]. Para cargar las señales UFMC y GFDM generadas en la sección anterior, es necesario convertirlas en un archivo binario (.bin), para lo cual se aplica el Código 2.10 mediante la función `agt_awg_savebin`.


```
agt_awg_savebin('ArchivoBIN', Senal);
```

Código 2.10: Conversión de la señal UPMC/GFDM a un archivo .bin.

Verificando que el AWG se encuentre conectado a la misma LAN que la PC, se procede a cargar al archivo en el canal 1. El nivel de voltaje de salida se coloca en 0.25 V con un offset de 0 V. La ruta se configura para que la señal atraviese el filtro de 500 MHz, y al final, se retira la referencia negativa del canal. Una vez que todo el canal óptico se encuentre armado, se coloca la opción *Play* para enviar la señal al AWG [56]. La interfaz que maneja el Control Utility y las opciones de configuración mencionadas se muestran en la Figura 2.6.

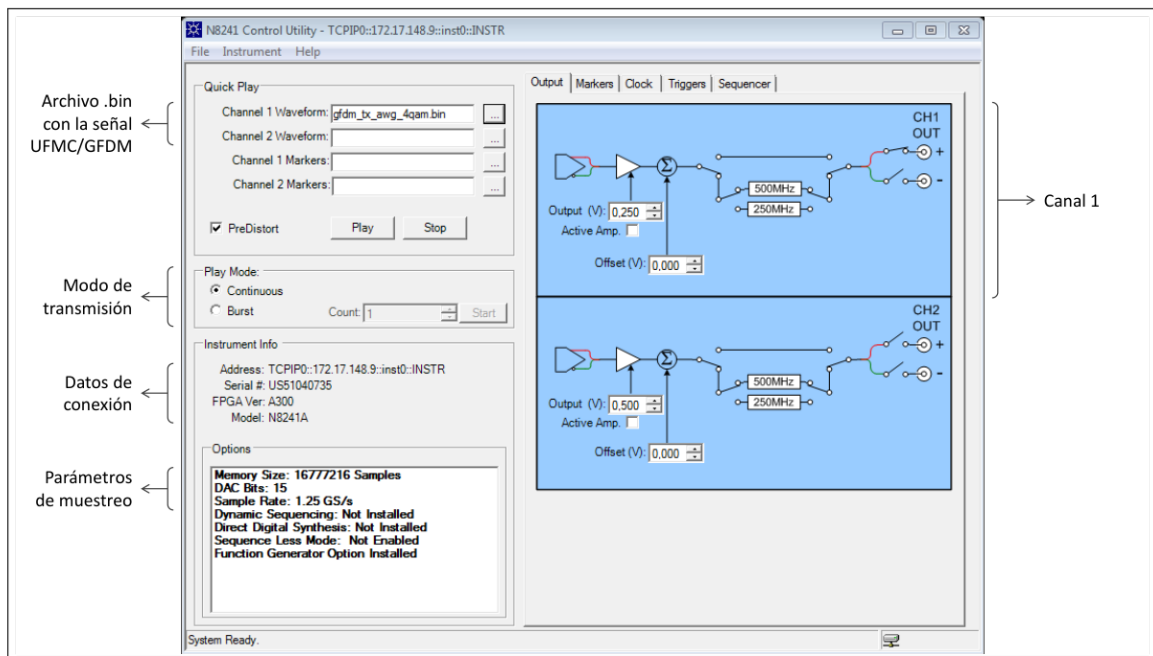


Figura 2.6: Configuración en la interfaz gráfica del Agilent Control Utility.

En la Tabla 2.5 se muestran los parámetros utilizados en la configuración del AWG en el Control Utility para la salida de la señal RF.

Tabla 2.5: Parámetros de configuración del AWG.

Parámetro	Valor
Salida de datos RF	Canal 1
Frecuencia de señal	1 GHz
Voltaje de salida	0.25 V
Filtro aplicado	500 MHz

2.4.2 LÁSER DE ONDA CONTINUA

Un láser de onda continua emite una onda de luz con amplitud constante y cuya duración es infinita. El láser que se emplea en la implementación es el IdPhotonics CoBrite MX, el cual es un módulo o tarjeta de 4 fuentes de luz láser que funcionan en las bandas C y L. Este módulo se inserta en el chasis IdPhotonics CBMA24, diseñado para un número mediano de canales. Posee la capacidad de albergar hasta 6 tarjetas de láseres, es decir, tiene un máximo de 24 fuentes de luz. Esta característica lo hace escalable y ajustable, dependiendo del número de canales requerido. Además, presenta un interruptor de seguridad por canal para activar y desactivar la emisión de luz [57]. Tanto el módulo como el chasis y sus principales características se presentan en la Figura 2.8.

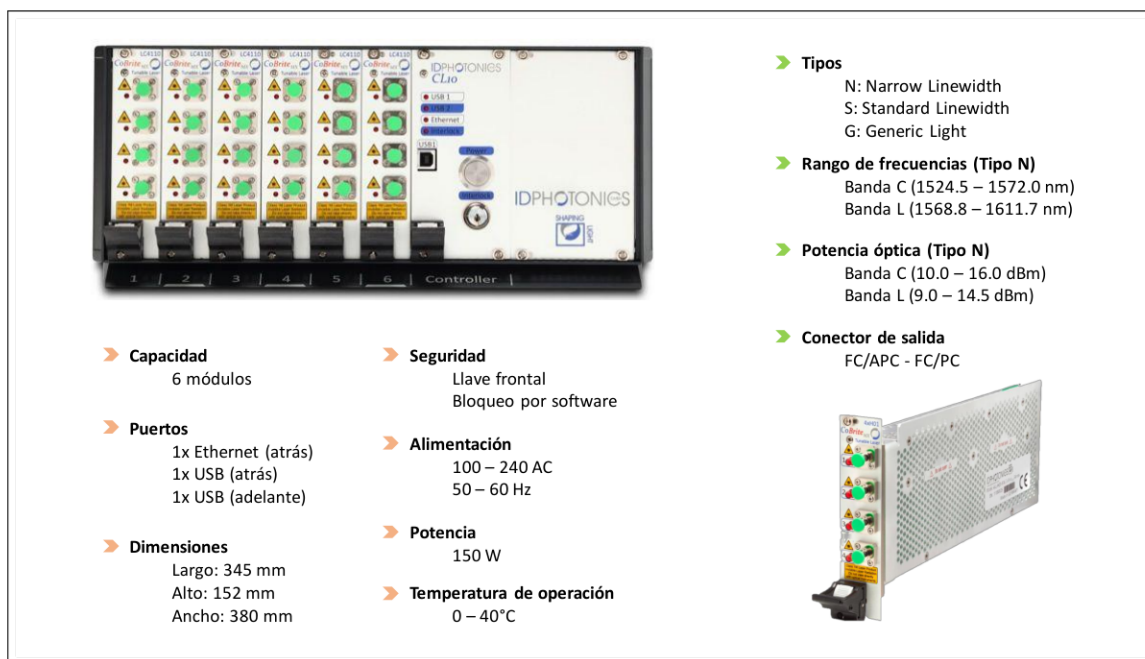


Figura 2.7: Características del chasis de láser IdPhotonics CBMX24 y módulo CoBrite MX [58].

El módulo CoBrite MX permite utilizar un amplio rango de sintonización de frecuencias en las bandas C y L, utilizando tres tipos de láser para cubrir diferentes aplicaciones, que van desde transmisión coherente en banda ultra estrecha hasta la generación de DWDM [58].

- ❑ **Tipo N:** Ancho de línea estrecho (Narrow Linewidth), ofrece un ancho de línea menor a 25 kHz con una potencia de salida ajustable hasta 16 dBm y un amplio rango de sintonización de frecuencias en las bandas C y L [58].
- ❑ **Tipo S:** Ancho de línea estándar (Standard Linewidth), permite un ancho de línea típico de 80 kHz con una potencia de salida ajustable hasta 17.8 dBm y sintonización rápida de 1 segundo [58].

- ❑ **Tipo G:** Fuente de luz genérica (Generic Light Source), es un láser de uso general con un ancho de línea de 100 kHz y rango de sintonización estándar [58].

En la implementación del canal óptico, se realiza la configuración del láser con los parámetros presentados en la Tabla 2.6.

Tabla 2.6: Parámetros de configuración del láser CW.

Parámetro	Valor
Tipo de láser	N
Longitud de onda	1550 nm
Potencia óptica	16 dBm

2.4.3 MODULADOR ÓPTICO

Un modulador Mach-Zehnder es un dispositivo utilizado para modificar la fase o la amplitud de una señal óptica a través de una señal de voltaje. Está basado en un interferómetro, donde la señal óptica se divide en dos trayectorias y son controladas por una señal de voltaje [59]. Al aplicar 0 V, las señales ópticas se interfieren entre sí anulando la salida, mientras que al aplicar una señal mayor a 0 V, se obtiene una señal óptica cuya amplitud depende del voltaje aplicado. Los moduladores Mach-Zehnder son ampliamente utilizados para la codificación de información en señales ópticas [60]. El modulador empleado en el canal óptico es el ThorLabs LNA2124, el cual es un modulador de intensidad de banda ancha. Los elementos y características de este componente se muestran en la Figura 2.8.

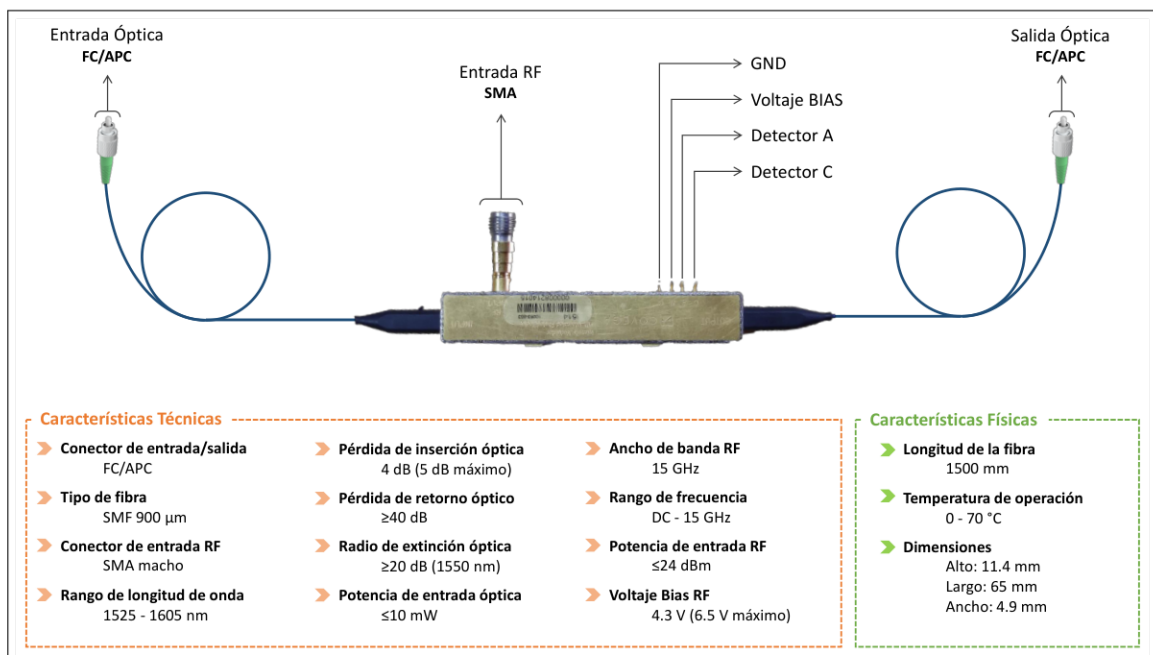


Figura 2.8: Características del modulador óptico ThorLabs LNA2124 [61].

Al ser un modulador de intensidad óptica, este se compone internamente de niobato de litio (LiNbO₃). Posee un puerto de entrada para la señal de control que modula la señal óptica, y un par de pines para el voltaje de polarización (voltaje Bias) del modulador. Este dispositivo es de corte Z (Z-cut), es decir que no permite la modulación simétrica en los brazos del interferómetro, produciendo un ligero cambio de fase a la salida. Sin embargo, presenta una mejor superposición en los campos eléctricos resultando en una mayor eficiencia de accionamiento, a comparación de los moduladores de corte X (X-cut) [61]. La señal óptica modulada depende principalmente del voltaje de polarización aplicado al modulador. Aunque también se toma en cuenta otros parámetros que garantizan una buena calidad de transmisión, como el radio de extinción.

- ❑ **Voltaje Bias:** Es el voltaje de polarización aplicado al modulador óptico con el fin de obtener una máxima transmisividad de la señal óptica. Este parámetro indica la cantidad de luz transmitida por el modulador en relación con la cantidad de luz que recibe por parte del láser. De esta forma, con el voltaje Bias se disminuye al máximo el nivel de atenuación de la señal óptica [60].
- ❑ **Radio de extinción:** Es la relación entre la intensidad de luz que se transmite en estado ON y en estado OFF. Es decir, relaciona el valor máximo y mínimo de potencia óptica que se transmite [62].

Para configurar el modulador óptico y asegurar la máxima potencia óptica a la salida, se toma en cuenta los parámetros presentados en la Tabla 2.7.

Tabla 2.7: Parámetros de configuración del modulador óptico.

Parámetro	Valor
Longitud de onda	1550 nm
Voltaje Bias	2.33 V

2.4.4 FIBRA ÓPTICA

La fibra óptica G.652D es ampliamente utilizada en las instalaciones de redes de acceso ópticas, redes metropolitanas y CCTV debido a que este tipo de fibra ofrece un excelente rendimiento en el espectro de longitud de onda entre 1260 a 1625 nm. Esto posibilita la utilización del canal óptico para servicios de datos, voz y video en un solo hilo de fibra. Tal como se indica en la Figura 2.2, en la fibra G.652D se presenta una baja atenuación en la región de pico de agua localizada en la longitud de onda de 1383 nm, por lo que se

permite el uso en el rango de 1360 y 1460 nm conformando la banda extendida (banda E) [63]. En la implementación física, se incorpora un rollo de fibra óptica G.652D de 20 km de longitud, esto debido a las especificaciones geométricas y ópticas que hacen posible una buena calidad de transmisión en largas distancias [64]. Entre estas propiedades se maneja principalmente la atenuación, la dispersión cromática y la dispersión de modo de polarización (PMD: Polarization Mode Dispersion), los cuales son explicados a continuación.

- ❑ **Atenuación:** Es la pérdida de señal óptica ocasionada por la dispersión, la absorción y la reflexión, que depende del material de fabricación. La atenuación es medida en cantidad de potencia pérdida por longitud de la fibra (dB/km) [65].
- ❑ **Dispersión cromática:** La fibra óptica es un medio que no transmite todas las longitudes de onda con una misma velocidad, lo que ocasiona que los pulsos ópticos se ensanchen y se superpongan. Este fenómeno es llamado dispersión cromática y su aparición puede provocar errores en la transmisión de datos [66].
- ❑ **Dispersión de modo de polarización:** Es un fenómeno producido por las propiedades de los materiales y forma de fabricación de la fibra óptica, lo que ocasiona retardos en los pulsos de luz. Esto puede afectar negativamente a la calidad de transmisión y a la capacidad de transporte de información [67].

En la Tabla 2.8 se indica los valores manejados para las propiedades geométricas y ópticas de acuerdo a la recomendación G.652D y que se tienen en el rollo de fibra que compone el canal óptico. Se toma en cuenta que los parámetros de atenuación y dispersión aumentan con la longitud de la fibra.

Tabla 2.8: Propiedades geométricas y ópticas de la fibra G.652D a 1550 nm, basado en [63]

Propiedad	Valor
Diámetro de revestimiento	125 mm
Diámetro de núcleo	9 mm
Diámetro de campo modal	10.3 ± 0.5 mm
Coefficiente de atenuación	Menor a 0.24 dB/km
Dispersión cromática	Menor a 18 ps/(nm.Km)
PMD	Menor a 0.1 ps/ $\sqrt{\text{km}}$
Índice de refracción	1.467

2.4.5 ATENUADOR VARIABLE

Un atenuador variable permite introducir pérdidas en el enlace óptico, de tal forma que representa la existencia de divisores de señal y la utilización de los usuarios, los cuales componen la PON. En el canal óptico implementado se incorpora el atenuador GAOTek GAO-VOA-103, el cual es un dispositivo diseñado para trabajar con fibras SMF. Mediante el dial giratorio se atenúa la señal óptica de forma continua gracias al uso de un filtro de densidad neutra. Es utilizado principalmente en sistemas digitales de comunicación, investigación y desarrollo de equipos de comunicaciones ópticas y mantenimiento de redes de acceso ópticas [68]. Este modelo permite variar la atenuación entre 2.5 y 60 dB con una resolución de 0.05 dB, dicho valor se visualiza en su pantalla LCD. La longitud de onda es configurable, sin embargo se cuenta con valores predeterminados. Funciona mediante una batería por lo que es portable y ligero [69]. Las características principales y componentes de este atenuador son presentadas en la Figura 2.9.



Figura 2.9: Características del atenuador variable GAOTek GAO-VOA-103 [69].

Este componente es importante en la realización del análisis comparativo, pues permite variar la potencia óptica y por lo tanto, determinar la calidad de transmisión. Es así que se puede calcular el BER y el EVM. Los parámetros de configuración del atenuador se muestran en la Tabla 2.9.

Tabla 2.9: Parámetros de configuración del atenuador variable.

Parámetro	Valor
Longitud de onda	1550 nm
Rango de atenuación	8 - 23 dB
Intervalo	1 dB

2.4.6 FOTODETECTOR PIN

Un fotodiodo PIN (PIN: P-Intrinsic-N Photodiode) es un dispositivo que se compone de dos capas de semiconductores con una capa intermedia de material intrínseco, el cual es fotosensible. Las capas externas están constituidas por una de tipo N (carga negativa) y una tipo P (carga positiva) [70]. Al incidir una señal de luz sobre el material intrínseco, se genera una corriente eléctrica. Esta capa posee una alta sensibilidad y una baja capacitancia, permitiéndole detectar pulsos ópticos a altas velocidades [71]. El fotodetector empleado en la implementación del canal óptico es el LabBuddy DSC-R402. Cuenta con una entrada óptica para conectores FC/UPC y una salida eléctrica para cable coaxial con conector SMA hembra. Permite recuperar señales en RF con un máximo de 10 GHz, manejando velocidades de hasta 10 Gbps y una capacidad de detección de pulsos ópticos de entre 10 a 50 ps de duración. Este equipo es utilizado en conjunto con analizadores de espectro, osciloscopios y medidores de potencia de RF [72].

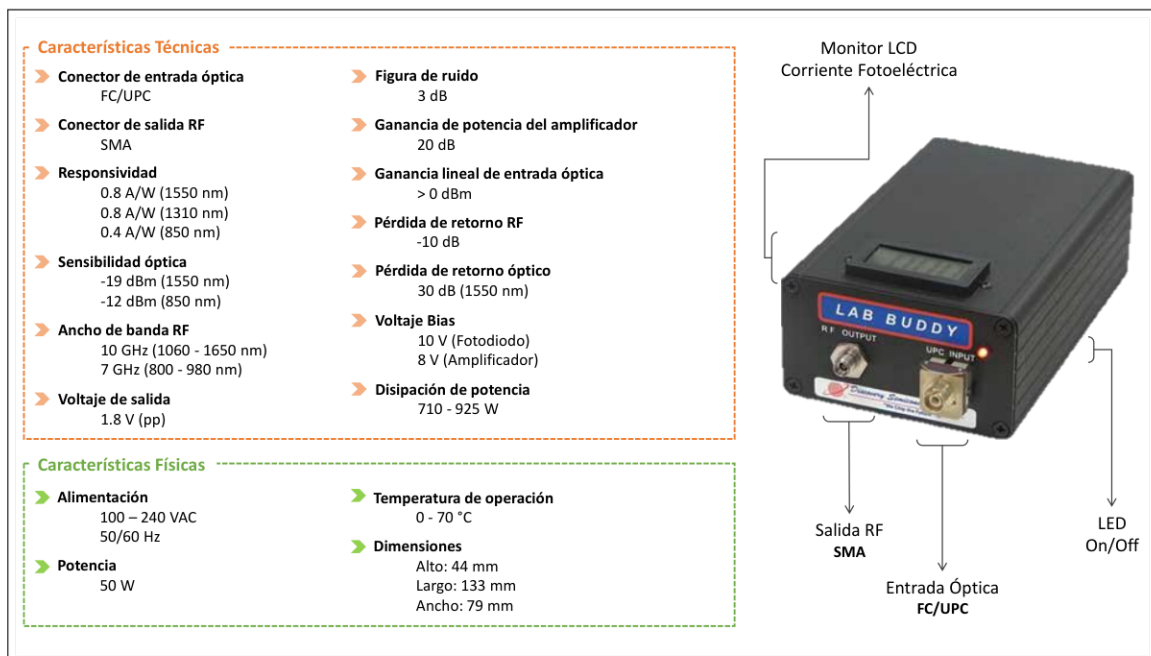


Figura 2.10: Características del fotodetector PIN LabBuddy DSC-R402 [72].

Este modelo de fotodetector ofrece una alta responsividad, especialmente en las longitudes de onda de 1310 y 1550 nm, con una sensibilidad de -19 dBm [72]. Estos parámetros son

esenciales en un detector óptico dado que influyen en la capacidad de conversión de la señal óptica en eléctrica.

- ❑ **Responsividad:** Es la capacidad que tiene el fotodetector para convertir la señal óptica en una corriente eléctrica. En otras palabras, indica la relación entre la corriente que genera el detector y la potencia óptica que recibe. Este parámetro depende del tipo de fotodetector y de la longitud de onda, y se mide en amperios por vatio (A/W). Una mejor responsividad representa una mejor sensibilidad y precisión del detector [73].

- ❑ **Sensibilidad:** Es el valor mínimo de potencia óptica que puede recibir el detector para que se pueda generar una señal eléctrica. Este parámetro depende de la longitud de onda. De esta forma, si la potencia óptica recibida es mayor o igual a la sensibilidad, los datos pueden ser recuperados de forma adecuada, de lo contrario, la información puede llegar errada [73].

Dado que el fotodetector utilizado realiza la conversión opto-eléctrica de forma automática, no se requiere configurar parámetros para la transmisión, pero se toma en cuenta su valor de sensibilidad y que puede admitir como máximo una potencia óptica de -3 dBm.

2.4.7 ANALIZADOR DIGITAL DE SEÑALES

Un DSA es un equipo de medición utilizado para el análisis de distintos tipos de señales, las cuales pueden ser de naturaleza digital o analógica. Se aplican modelos matemáticos para llevar la señal desde el dominio temporal al espectro de frecuencias, de esta forma se puede hallar anchos de banda y densidades de potencia. El DSA utilizado en la implementación es el KeySight DSA, el cual posee 4 canales de entrada para señales analógicas con un ancho de banda de 16 GHz. Posee la capacidad de muestrear las señales con una tasa de 80 GS/s con una resolución de 8 bits [74]. En la Figura 2.11 se presentan sus principales características y elementos. Una vez conectado el DSA al resto de elementos del canal óptico y también a la LAN, se transmite la señal UFMC y GFDM. Por cada forma de onda y orden de modulación QAM se realiza una transmisión, y además, cada variación aplicada en el atenuador variable es una señal diferente, de donde se va a calcular el BER y el EVM. Es indispensable guardar las señales en un archivo de texto (.txt) para que posteriormente puedan ser cargadas y procesadas en Matlab.

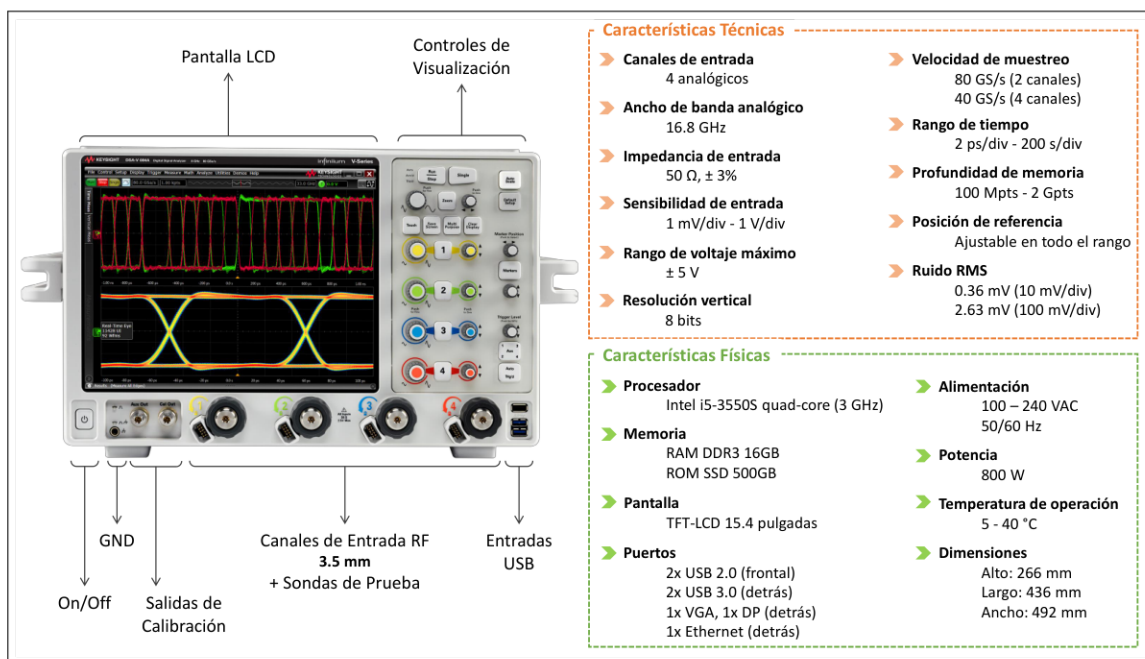


Figura 2.11: Características del DSA KeySight DSAV164A [75].

Para cargar las señales UFMC y GFDM transmitidas, se utiliza el Código 2.11 para cada una de las formas de onda, órdenes de modulación y valores de atenuación.

```
SenalRX = load(SenalRX_UFMC/GFDM_XQAM_XdB.txt)
```

Código 2.11: Carga de la señal en Matlab.

En la Tabla 2.10 se indican los parámetros para muestrear y extraer la señal del canal óptico mediante el DSA.

Tabla 2.10: Parámetros de configuración del DSA.

Parámetro	Valor
Entrada de datos RF	Canal 1
Muestras	5 GS
Archivo de señal	.txt

2.5 RECEPCIÓN DE DATOS

En la recepción de datos, se procesa las señales UFMC y GFDM una vez obtenidas del DSA. Tal como se muestra en la Figura 2.3, la señal pasa por el retiro de la señal de sincronismo, aplicación de ecualización y la demodulación QAM de los símbolos recibidos con el objetivo de determinar el BER y el EVM, así como obtener el diagrama de constelación y la PSD. Se toma en cuenta que los parámetros de recepción deben ser los mismos a los de transmisión, de lo contrario pueden presentarse errores y resultados no adecuados.

Como primer paso, se retira la componente de corriente continua (DC: Direct Current) de la señal. Esta es sincronizada con ayuda de la señal PBRS cuya longitud es la misma a la generada en la transmisión. Luego, se retiran las señales aumentadas, es decir, la de sincronismo y el relleno de ceros, en el caso de que haya sido agregado. Además, si la señal fue separada en componentes real e imaginario, se debe volver a concatenar estas partes, antes de pasar a la ecualización y demodulación.

Dentro de esta sección se explica brevemente la recuperación de los datos a partir de las formas de onda UFMC y GFDM, describiendo los segmentos de código más importantes.

2.5.1 RECEPTOR UFMC

2.5.1.1 Retiro de la componente DC

El retiro de la componente DC se realiza con ayuda de la FFT para pasar del dominio temporal al dominio armónico. El propósito de eliminar este dato es normalizar la señal recibida. La componente DC corresponde a la frecuencia de 0 Hz, esta es suprimida y en su lugar se coloca el valor 0, tal como se muestra en el Código 2.12. Luego, se vuelve al dominio temporal con la aplicación de la IFFT obteniendo solo su parte real [42].

```
SenalFFT = fft(SenalRX)
SenalFFT(1) = 0
SenalRX = real(ifft(SenalFFT))
```

Código 2.12: Retiro de la componente DC de la señal UFMC.

2.5.1.2 Retiro de las señales aumentadas

Dado que la señal obtenida del paso anterior contiene la señal PBRS, de longitud 128 bits, al inicio, esta debe retirarse, tal como se indica en el Código 2.13. Cuando se encuentra la primera componente de la señal de sincronismo, se procede a retirar la misma. En el caso de aumentar al final un relleno de ceros para garantizar la divisibilidad para 8, se debe retirarlo [42].

```
SenalEntrada = SenalRX(length(SenalPBRS) : length(SenalRX) - length(
    Divisibilidad))
```

Código 2.13: Retiro de las señales aumentadas.

2.5.1.3 Recuperación de la señal

En el Código 2.14 se toma las partes real e imaginaria que fueron concatenadas y se las segmenta a la mitad para que la señal UFMC se componga de valores complejos previo al paso por la FFT [42].

```
ParteReal = SenalRX(1:length(SenalRX)/2)
ParteImag = SenalRX(length(ParteReal)+1:length(SenalRX))
UFMC_RX = ParteReal + ParteImag*1i
```

Código 2.14: Retiro de las señales aumentas.

Para el ensamblaje de la señal UFMC se colocó una banda de guarda compuesta de ceros con el fin de garantizar el funcionamiento de la FFT, es decir, con dicho relleno la cantidad de puntos es el doble de la longitud de la señal, por lo que se toma solo las frecuencias de índice par. Esta acción evita la incorporación de distorsión presente en la componente de índice impar. La señal resultante pasa al proceso de ecualización por banda donde se mitiga el efecto del filtro aplicado en la transmisión. Así, los datos son separados en sus respectivas sub-portadoras y están listos para ser demodulados [42].

2.5.2 RECEPTOR GFDM

2.5.2.1 Retiro de la componente DC

Tal como se explicó anteriormente, el retiro de la componente DC consiste en asignar el valor de 0 a la frecuencia de 0 Hz de la señal. Para esto, se tiene el Código 2.15, donde `SenalRX` es la señal GFDM recibida, `SenalRef` es la señal de control de sincronismo, `max` es una función que devuelve el valor máximo de un vector y su posición `nmax`, `abs` convierte todo número negativo en positivo y `circshift` es una función que realiza desplazamientos de valores en un vector de forma circular [43].

```
Y1 = fft(SenalRX)
Y2 = fft(SenalRef)
Y = ifft(Y1.*conj(Y2))
[max nmax] = max(abs(Y(1:(length(Y)/2))))
SenalRX = circshift(Datos , [-nmax+1 0])
```

Código 2.15: Retiro de la componente DC en la señal GFDM.

2.5.2.2 Retiro de relleno de ceros

En el caso de haber colocado un relleno de ceros en el transmisor para facilitar la sincronización de la señal sin modificaciones causadas por el canal, se lo retira mediante el Código 2.16. Se divide la señal en parte real e imaginaria con el fin de facilitar el retiro del relleno de ceros [43].

```
SenalGFDM = SenalRX(1:length(SenalRX))
ParteReal = SenalGFDM(1:length(SenalGFDM)/2)
ParteImag = SenalGFDM(length(ParteReal)+1:length(SenalRX))
```

Código 2.16: Retiro del relleno de ceros.

2.5.2.3 Sincronización de la señal

La sincronización de la señal se realiza en dos etapas: i) la primera para la parte real y la ii) segunda para la parte imaginaria, tal como se muestra en el Código 2.17. Luego se combinan ambas partes en un solo vector que contiene valores complejos [43].

```
SyncReal = [0 PBRs([1 0 1 1 0 1 1 1 1] , [9 8])]
ParteReal = ParteReal(length(SyncReal)+1:length(ParteReal))
SyncImag = [0 PBRs([0 1 0 1 0 1 1] , [7 6])]
ParteImag = ParteImag(length(SyncImag)+1:length(ParteImag))
GFDM_RX = ParteReal + ParteImag *1i
```

Código 2.17: Sincronización de la señal.

2.5.2.4 Recuperación de la señal

Tras sincronizar la señal, se realiza la recuperación de la señal original, para lo cual se aplica el Código 2.18. Aquí se utiliza la función `do_demodulate` para demodular los datos. La función `do_unmap` realiza un desmapeo de la señal antes de demodularla en M-QAM con la función `do_qamdemodulate` cuyo orden lo da el parámetro `gfdm.mu`.

```
T = do_demodulate(gfdm , GFDM_RX)
D = do_unmap(gfdm , T)
S = do_qamdemodulate(D , gfdm.mu)
```

Código 2.18: Recuperación de la señal original.

2.6 CÁLCULO DE ERRORES

Una vez que se recupera las señales UPMC y GFDM, se emplea el uso de dos herramientas para el cálculo de errores: el BER y el EVM. Estas métricas sirven para determinar el rendimiento y la calidad que poseen los sistemas de transmisión digital.

2.6.1 CÁLCULO DE BER

El BER es una métrica que relaciona la cantidad de bits transmitidos que llegan errados con el número total de bits enviados. Este valor se relaciona principalmente con la técnica de modulación aplicada y la afectación de la señal debido al canal de transmisión. Es decir, un sistema de comunicación digital es mejor al tener un BER relativamente bajo [43].

En la señal UPMC, los vectores de bits de la señal transmitida y recibida son comparados mediante la función `biterr`, la cual arroja como resultado el número de bits errados y el BER, tal como se muestra en el Código 2.19 [43].

```
[NumeroErrores , BER] = biterr(BitsTX , BitsRX)
```

Código 2.19: Cálculo de BER para la señal UPMC.

Para la señal GFDM se tiene el Código 2.20, donde se hace uso de la función `de2bi` para convertir los datos en formato binario. Luego, con la función de correlación `xor` se compara bit a bit y de esa forma se calcula el número de errores que se obtuvo en la transmisión [43][76].

```
BitsTX = de2bi(SenalTX , 'left-msb')
BitsRX = de2bi(SenalRX , 'left-msb')
NumeroErrores = sum(xor(BitsTX , BitsRX))
BER = NumeroErrores/length(BitsTX)
```

Código 2.20: Cálculo de BER para la señal GFDM.

2.6.2 CÁLCULO DE EVM

El EVM es una cantidad que mide la precisión que posee la modulación de un sistema de transmisión digital, dicho valor es la distancia existente entre el símbolo ideal y el símbolo recibido dentro de un diagrama de constelación. Matemáticamente el EVM se calcula con el valor cuadrático medio de los símbolos transmitidos, tomando en cuenta su posición y la

posición del símbolo ideal [77]. El EVM puede ser expresado en valor porcentual guardando una relación inversamente proporcional con la calidad de la transmisión.

En la señal UFMC, el cálculo del EVM se realiza con ayuda del objeto `comm.EVM`, el cual permite determinar la posición de los símbolos recibidos en referencia a la posición de los símbolos ideales. Además, toma como parámetro al orden de modulación M que tendrá el diagrama de constelación [42]. Este proceso se muestra en el Código 2.21.

```
EVM = comm.EVM
EVM.ReferenceConstellation = qammod(0:M-1 , M)
EVM_UFMC = EVM(SimbolosRX)
```

Código 2.21: Cálculo de EVM para la señal UFMC.

2.7 OBTENCIÓN DE GRÁFICAS DE CONTROL EN MATLAB

Como herramientas adicionales para verificar la calidad de transmisión de las formas de onda UFMC y GFDM, se obtiene mediante Matlab el diagrama de constelaciones y la densidad espectral de potencia.

2.7.1 DIAGRAMA DE CONSTELACIÓN

El diagrama de constelación es una herramienta gráfica que sirve para analizar la calidad de señal recibida en un sistema de comunicación digital. Muestra la distribución en fase y cuadratura de los símbolos recibidos de acuerdo con el esquema de modulación M-QAM, comparándolos con las posiciones referenciales o ideales, de esta manera se determina si un símbolo llega errado [78].

Para generar esta gráfica se utiliza la función `comm.ConstellationDiagram`, que representa la señal recibida en el plano real e imaginario. En el caso de la señal UFMC, representado en el Código 2.22, previamente se debe generar un objeto de modulación QAM con `qammod` introduciendo como parámetro al orden de modulación M . Mientras tanto, en la señal GFDM se introduce el valor de M directamente en el parámetro `SamplesPerSymbol` de la función, tal como se muestra en el Código 2.23. Adicionalmente, se puede agregar otros elementos en la sintaxis como la constelación de referencia y el número de símbolos mostrados. Finalmente, se introduce como parámetro del diagrama de constelación a los símbolos recibidos de cada forma de onda [42][43].

```

referenciaQAM = qammod(0:M-1 , M)
DConstelacion = comm.ConstellationDiagram('
    ReferenceConstellation' , referenciaQAM)
DConstelacion(SimbolosRX)

```

Código 2.22: Obtención del diagrama de constelación para los símbolos recibidos en UFMC.

```

DConstelacion = comm.ConstellationDiagram('SamplesPerSymbol' , M
    , 'SymbolsToDisplaySource' , 'Property')
DConstelacion(SimbolosRX)

```

Código 2.23: Obtención del diagrama de constelación para los símbolos recibidos en GFDM.

2.7.2 DENSIDAD ESPECTRAL DE POTENCIA

Mediante la PSD se puede analizar visualmente la distribución de potencia que poseen las componentes armónicas de una señal, lo cual sirve para caracterizarla en el dominio de la frecuencia. Así se pueden obtener métricas importantes como el ancho de banda y la potencia media. La densidad de potencia muestra la cantidad de energía en función de la frecuencia, y se mide en unidades de energía por ciclo, como por ejemplo W/Hz [79].

Para la obtención de la PSD se utiliza la función `psd_signal` descrita en el Código 2.24. Esta función recibe como parámetro a la señal de datos S , la frecuencia de muestreo F_s y la impedancia de entrada R cuyo valor es 1. El resultado es un vector de frecuencias f y otro vector que contiene los valores de densidad de potencia PSD. Adicionalmente, se genera una gráfica que muestra la PSD en función de la frecuencia. Dado que la función `psd_signal` trabaja de forma bilateral, se presentan componentes en frecuencia positivas y negativas, lo cual es causado por el uso de la FFT [42].

```

[PSD , f] = psd_signal(S , Fs , R)

```

Código 2.24: Obtención de la PSD para las señales UFMC y GFDM.

3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1 RESULTADOS

El presente apartado muestra los resultados que se obtuvieron en la implementación física del sistema de transmisión RoF al trabajar con las formas de onda UFMC y GFDM. Los resultados se muestran en forma comparativa para cada orden de modulación M-QAM, tanto para los valores de BER como para los de EVM obtenidos. Para esto se toma en cuenta un umbral mínimo o requerimiento para una BS que trabaja en modo de conexión no autónomo (NSA: Non-Stand Alone), el cual es especificado en el Release 16 del 3GPP para las redes móviles 5G. Estos requerimientos de EVM y BER son presentados en la Tabla 3.1 para cada esquema de modulación utilizado.

Tabla 3.1: Requerimiento de EVM y BER mínimo para una BS, basado en [80].

Modulación	EVM [%]	BER
4-QAM	17.5	10e-3
16-QAM	12.5	
64-QAM	8	
256-QAM	3.5	

Como primer parte del presente apartado, se muestran los resultados generales que se obtienen en el sistema de transmisión, donde se indica las señales UFMC y GFDM que se envían por el canal óptico así como sus respectivas PSD. Posterior, se indica las gráficas comparativas para el BER y el EVM que son representados en función de la potencia óptica recibida en el fotodetector y que son obtenidas al modificar el orden de modulación M-QAM. Adicionalmente, se presenta las tablas de valores de BER y EVM que fueron calculados previamente para la elaboración de las gráficas. Finalmente se presenta las gráficas para comparar y analizar todos los resultados obtenidos, tanto para el BER como para el EVM.

3.1.1 CONFIGURACIÓN DE PARÁMETROS

Para la implementación del enlace óptico, se toma en cuenta los parámetros establecidos en la Tabla 3.2 para los diferentes equipos utilizados. En el caso del fotodetector se considera su rango de operación para la obtención de resultados, ya que trabajar por encima del límite (-3 dBm) podría quemar el equipo, mientras que trabajar por debajo de la sensibilidad (-19 dBm) causa la recuperación errónea de la señal.

Tabla 3.2: Configuración de parámetros en el canal óptico.

Equipo/Material	Parámetro	Valor
AWG	Salida de datos RF	Canal 1
	Frecuencia de señal	1 GHz
	Voltaje de salida	250 mV
	Filtro aplicado	500 MHz
Láser	Tipo de láser	N
	Longitud de onda	1550 nm
	Potencia óptica	16 dBm
Modulador óptico	Voltaje BIAS	2.33 V
Fibra óptica	Tipo	SMF
	Atenuación	0.24 dB/km
	Dispersión cromática	18 ps/(nm.km)
	PMD	0.1 ps/ $\sqrt{\text{km}}$
Atenuador variable	Rango	8 - 23 dB
	Intervalo	1 dB
Fotodetector	Potencia máxima	-3 dBm
	Sensibilidad	-18 dBm
DSA	Entrada de datos RF	Canal 1
	Número de muestras	5 GS
	Tamaño de memoria	1 M
	Archivo de señal	.txt

3.1.2 RESULTADOS GENERALES DEL SISTEMA ROF

Para obtener un buen funcionamiento del sistema RoF, se analiza las señales UPMC y GFDM que se van a utilizar en la transmisión. En la Figura 3.1 se muestran dichas señales en el dominio del tiempo, donde se puede apreciar la duración y el nivel de voltaje en cada una.

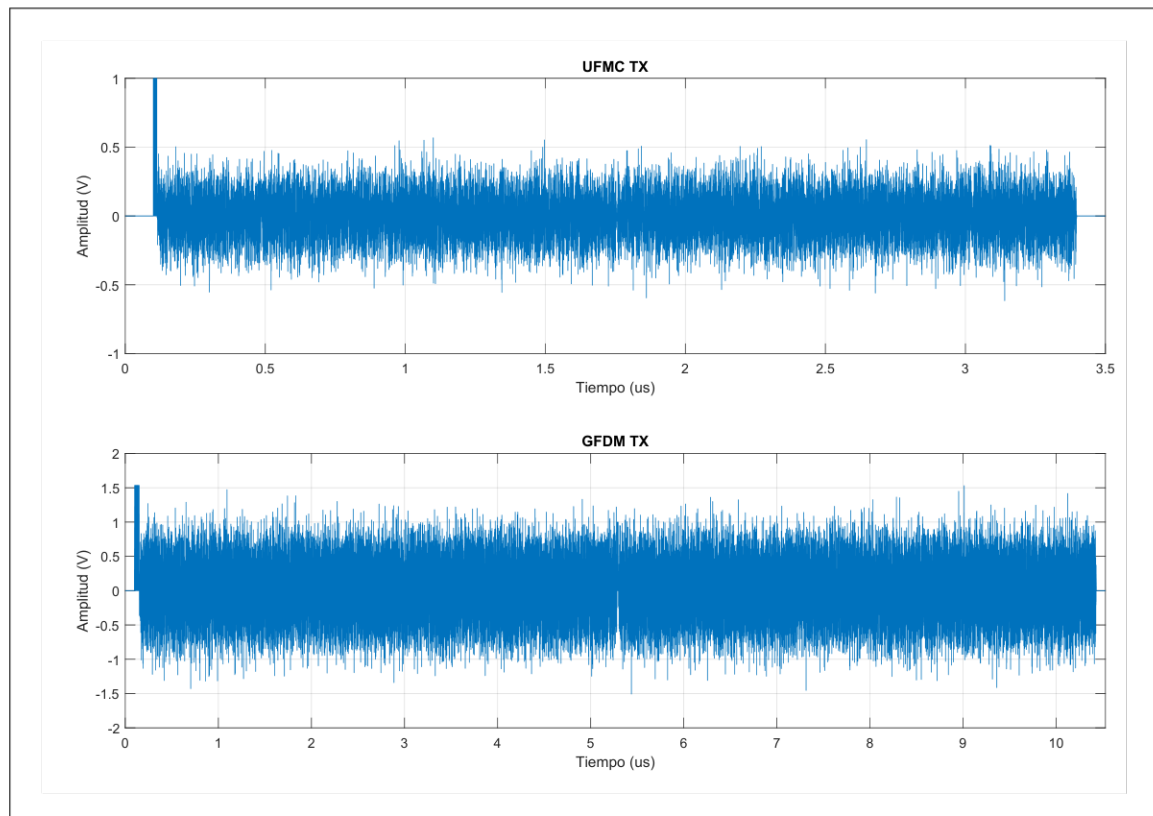


Figura 3.1: Señales UPMC y GFDM en el dominio del tiempo.

Para las dos señales de la Figura 3.1 se logra visualizar la señal de sincronismo en el inicio, justo después de una ventana de ceros. Esta señal binaria que se diferencia del resto de los datos, sirve para la sincronización una vez que ha atravesado el canal. Tomando en cuenta una velocidad de 10 Gbps, la señal UFMC posee una duración de 3.5 us, mientras que la señal GFDM dura aproximadamente, 10.5 us. Esta diferencia en el tiempo de duración viene dada por el número de sub-portadoras consideradas, así como el tamaño de las mismas.

En la señal UFMC se utilizó 100 sub-bandas con 100 sub-portadoras en cada una, es decir, que el tamaño de cada sub-banda es de 100 bits. De esta forma, la longitud del vector de bits es de 10000. Para la señal GFDM, se conformaron 128 sub-portadoras, de las cuales 34 son utilizadas para el envío de datos. Cada sub-portadora cuenta con un tamaño de 400 bits, por lo tanto, la longitud del vector de bits es de 13600. Dependiendo del orden de modulación M-QAM que se utiliza, el vector de bits varía, por ejemplo, para 4-QAM se tiene en UFMC un vector de 20000 bits de longitud y en GFDM un vector de 27200 bits.

Adicionalmente, en la Figura 3.2 se observa la PSD para las señales UFMC y GFDM antes de salir al canal. Solamente se muestra el espectro unilateral para una mejor visualización del ancho de banda utilizado.

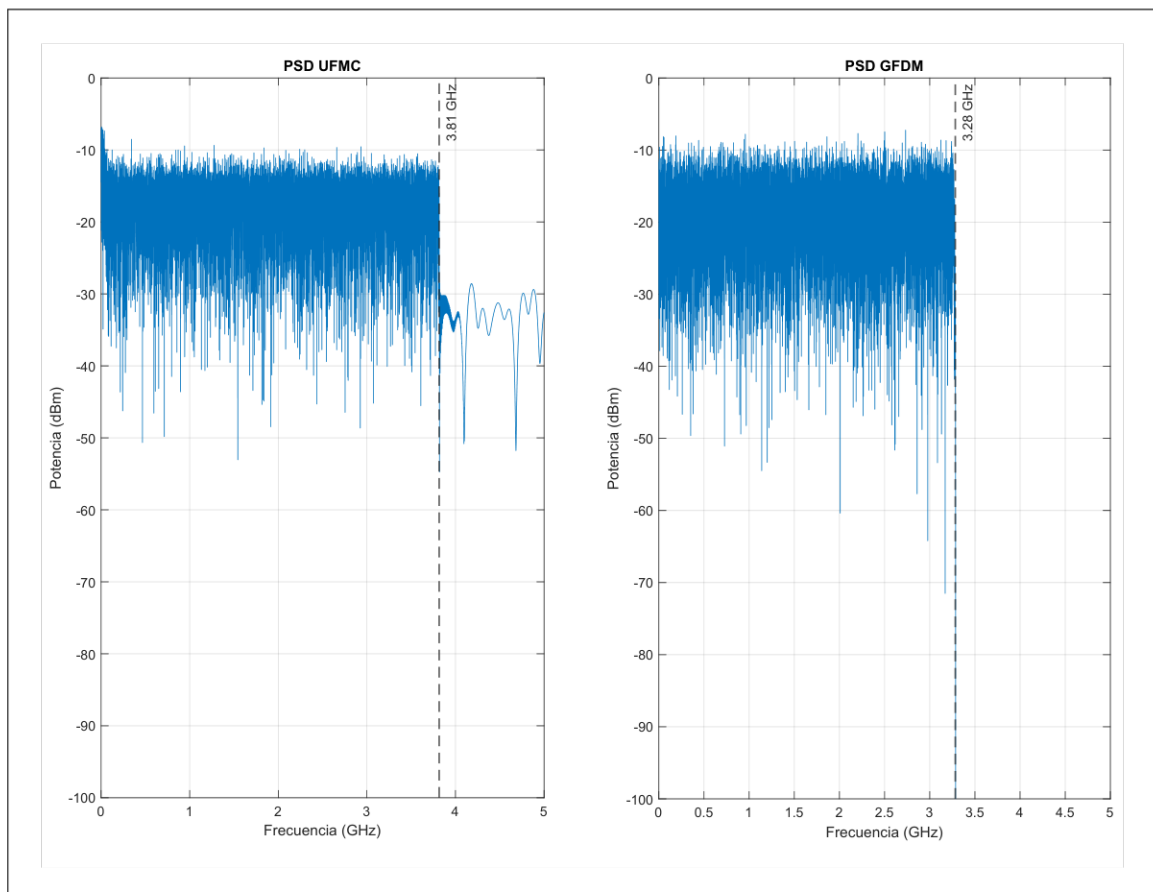


Figura 3.2: Densidad de potencia espectral de las señales UFMC y GFDM.

En ambos casos, la potencia espectral va desde los -30 a -10 dBm, dejando un ancho de banda de 3.81 GHz para la señal UFMC y 3.28 GHz para la señal GFDM. A pesar de que la longitud de bits en cada señal no es la misma, se logra observar que GFDM presenta una mejor ocupación del espectro dado que no maneja sub-bandas y no es necesario la ocupación de un filtro individual. Sin embargo, para un análisis más exhaustivo de las formas de onda UFMC y GFDM es preferible que posean la misma cantidad de bits de transmisión, a pesar de tener configuraciones diferentes de sub-portadoras y tamaños.

Si bien la señal UFMC presenta un espectro sobre todas las sub-bandas que la conforman, no se puede apreciar la distribución del espectro en cada una. Esto puede visualizarse en la Figura 3.3, donde la PSD de cada sub-banda de la señal UFMC se logra distinguir del resto. Se logra visualizar el efecto del filtro de Dolph-Chebyshev, en cuanto a su atenuación del lóbulo secundario. Si el valor de atenuación del filtro disminuye, se deja pasar más componentes de frecuencia dando paso a la formación de ICI.

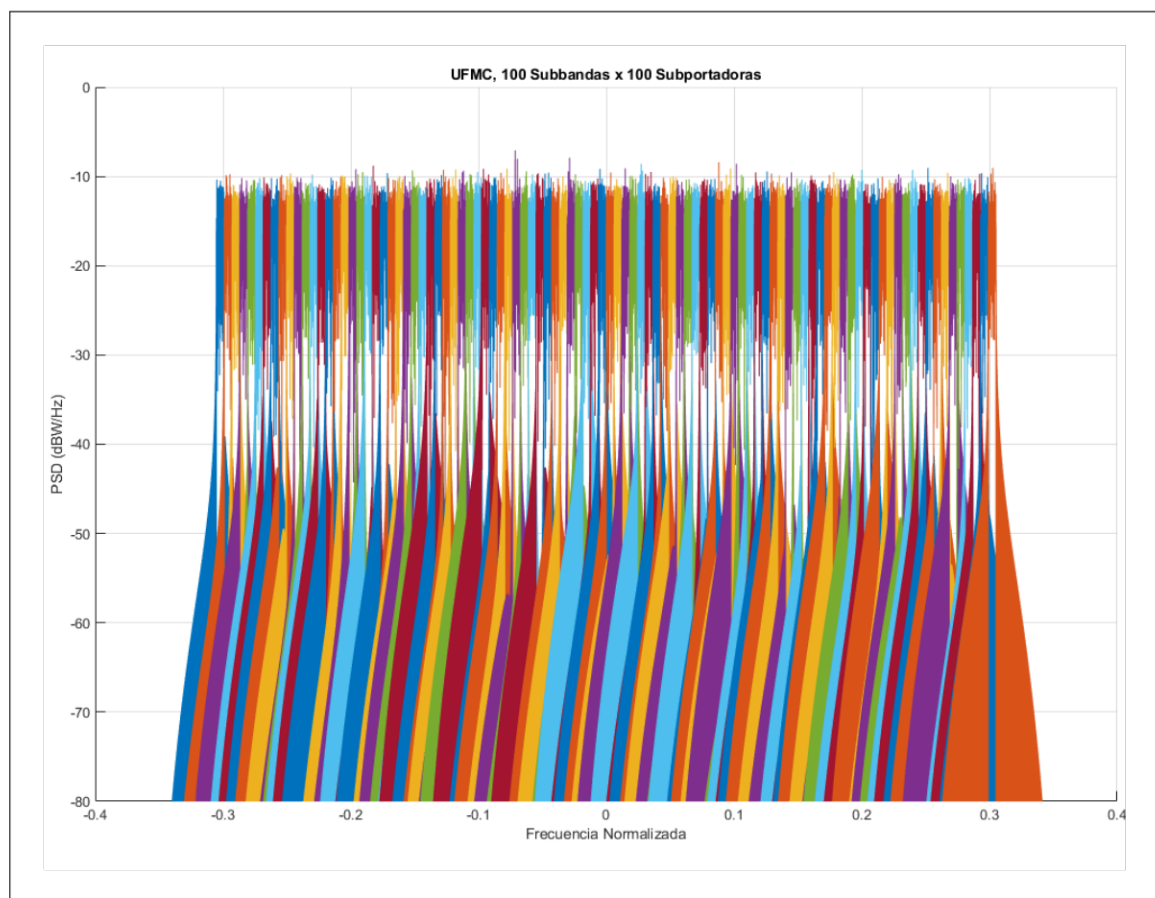


Figura 3.3: Densidad de potencia espectral con frecuencia normalizada para la señal UFMC.

3.1.3 RESULTADOS OBTENIDOS AL MODIFICAR LAS CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA

3.1.3.1 Resultados obtenidos al utilizar 4-QAM

Los resultados obtenidos al trabajar con el esquema de modulación 4-QAM se muestran en la Tabla 3.3. El rango de potencia óptica en la recepción es desde -18 dBm hasta -3 dBm obteniendo 16 mediciones para cada forma de onda. Para el BER se considera que el número total de bits transmitidos para la señal UFMC es de 20000 mientras que para la señal GFDM es de 27200. De acuerdo con la Tabla 3.1, se requiere como máximo un EVM de 17.5 % y un BER de $10e-3$.

Tabla 3.3: Mediciones de potencia óptica, BER y EVM para la modulación 4-QAM.

Potencia de recepción [dBm]	BER (UFMC)	Bits errados (UFMC)	EVM [%] (UFMC)	BER (GFDM)	Bits errados (GFDM)	EVM [%] (GFDM)
-3	0	0	10.27	0	0	11.20
-4	0	0	11.65	0	0	12.63
-5	0	0	13.00	0	0	14.19
-6	0	0	14.68	0	0	15.87
-7	0	0	16.45	0	0	17.86
-8	0	0	18.41	0	0	19.89
-9	0	0	20.65	0	0	22.28
-10	0	0	23.26	3.68e-5	1	25.20
-11	5.00e-5	1	25.89	2.21e-4	6	28.31
-12	5.00e-4	10	29.03	9.19e-4	25	31.75
-13	1.45e-3	29	33.65	2.83e-3	77	35.37
-14	3.00e-3	60	36.47	6.36e-3	173	39.70
-15	7.35e-3	147	40.63	1.38e-2	376	44.19
-16	1.64e-2	328	45.11	2.39e-2	650	48.56
-17	2.61e-2	521	50.01	3.67e-2	999	53.20
-18	4.04e-2	807	54.19	5.68e-2	1544	58.09

Con los datos obtenidos en la Tabla 3.3, se presenta las curvas de BER en la Figura 3.4 en una escala semilogarítmica y las curvas de EVM en la Figura 3.5 en una escala decimal. Para cada gráfica se muestra cuatro diagramas de constelaciones para una potencia menor y una potencia mayor, de esta forma se contrasta visualmente los resultados. En la Figura 3.4, se puede observar que al trabajar con 4 niveles de modulación, el BER es aceptable hasta una potencia de -12 dBm obteniendo 10 bits errados en UFMC y 25 en GFDM. Por arriba de esa potencia, el BER se hace más pequeño incluso hasta llegar a 0 en ambos casos, indicando que existe una transmisión de buena calidad. Los diagramas de constelaciones indican que en una potencia mayor, la señal puede ser recuperada sin problemas.

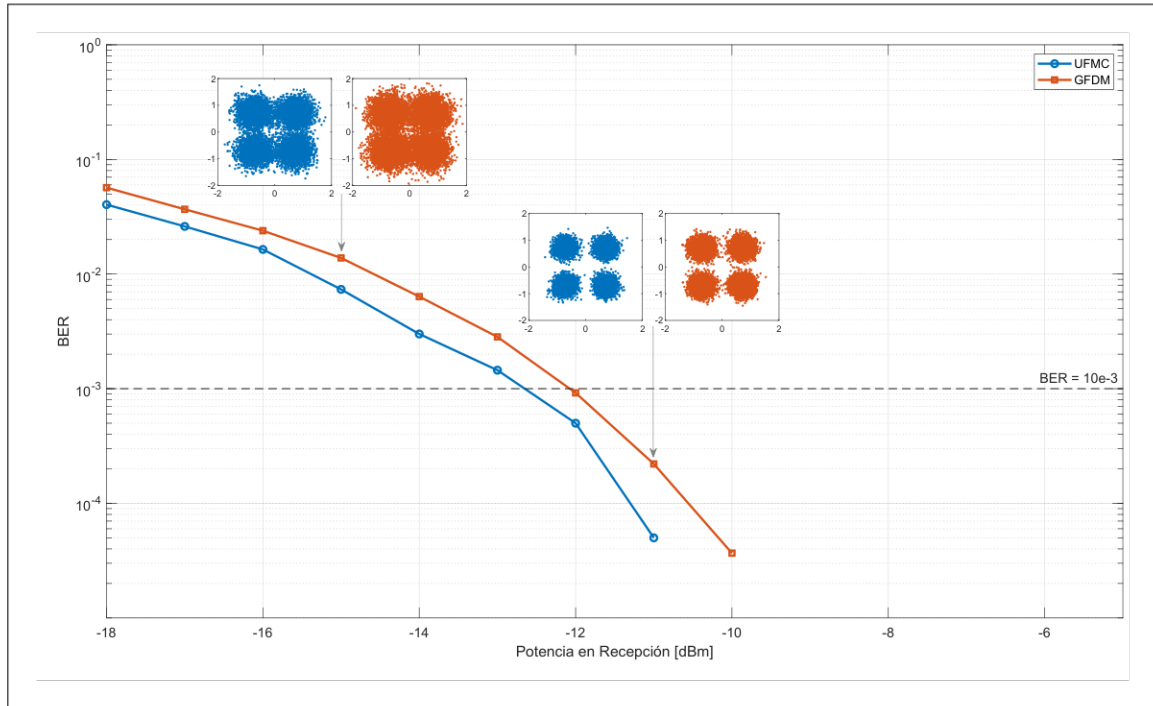


Figura 3.4: Potencia óptica de recepción vs. BER para la modulación 4-QAM.

En la Figura 3.5, el EVM presenta un valor aceptable hasta una potencia de -7 dBm en UFMC y hasta -6 dBm en GFDM. Por debajo de esa potencia, el EVM continúa creciendo de forma significativa, lo que indica que los símbolos están muy separados del sistema de referencia 4-QAM. Comparativamente, se logra apreciar que la forma de onda UFMC presenta un ligero mejor rendimiento con respecto a GFDM.

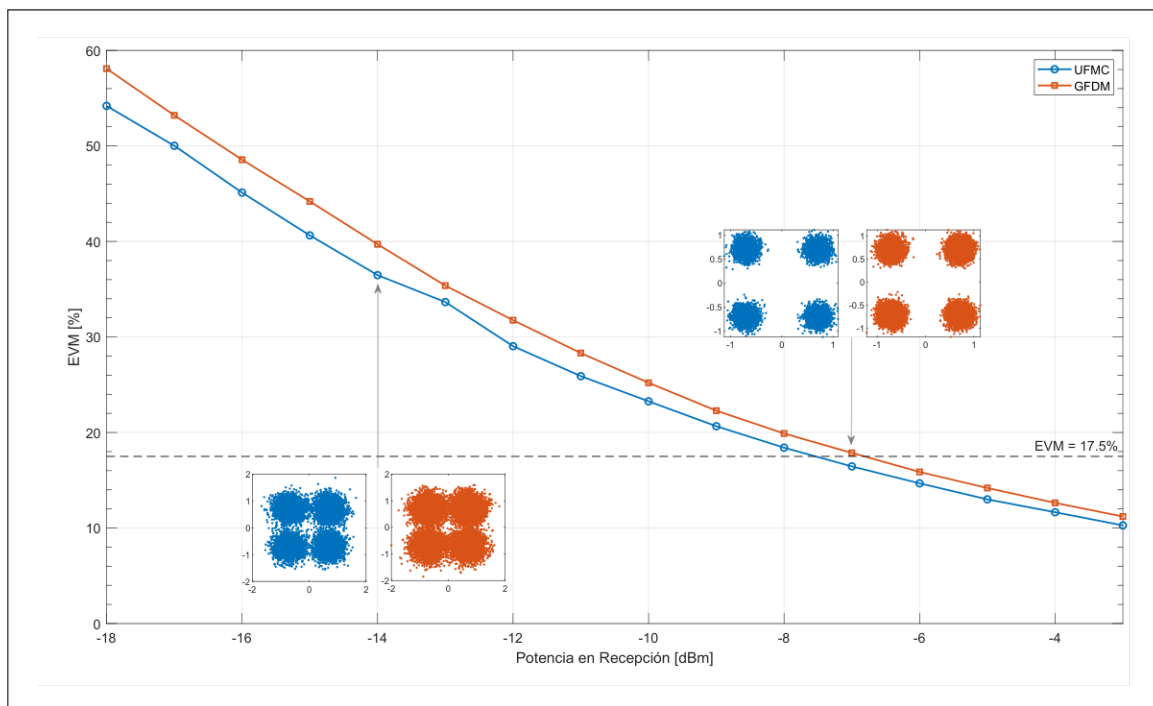


Figura 3.5: Potencia óptica de recepción vs. EVM para la modulación 4-QAM.

3.1.3.2 Resultados obtenidos al utilizar 16-QAM

Los resultados obtenidos al trabajar con el esquema de modulación 16-QAM se muestran en la Tabla 3.4. El rango de potencia óptica en la recepción es desde -18 dBm hasta -3 dBm obteniendo 16 mediciones para cada forma de onda. Para el BER se considera que el número total de bits transmitidos para la señal UFMC es de 40000 mientras que para la señal GFDM es de 54400. De acuerdo con la Tabla 3.1, se requiere como máximo un EVM de 12.5% y un BER de $10e-3$.

Tabla 3.4: Mediciones de potencia óptica, BER y EVM para la modulación 16-QAM.

Potencia óptica en recepción [dBm]	BER (UFMC)	Bits errados (UFMC)	EVM [%] (UFMC)	BER (GFDM)	Bits errados (GFDM)	EVM [%] (GFDM)
-3	0	0	8.79	1.84e-5	1	11.25
-4	0	0	9.91	9.19e-5	5	12.59
-5	5.00e-5	2	11.35	5.33e-4	29	14.24
-6	1.75e-4	7	12.94	1.82e-3	99	15.84
-7	7.25e-4	29	14.47	4.93e-3	268	17.55
-8	2.68e-3	107	16.28	9.32e-3	507	19.49
-9	6.55e-3	262	18.35	1.73e-2	939	21.21
-10	1.29e-2	515	20.42	2.86e-2	1558	23.06
-11	2.48e-2	991	22.50	4.27e-2	2324	24.87
-12	3.99e-2	1594	24.45	5.87e-2	3191	26.56
-13	5.49e-2	2197	26.16	7.92e-2	4310	28.26
-14	7.76e-2	3104	28.29	9.70e-2	5278	29.74
-15	9.82e-2	3926	29.66	1.20e-1	6538	31.50
-16	1.27e-1	5087	31.71	1.41e-1	7693	33.94
-17	1.48e-1	5927	34.42	1.66e-1	9016	36.00
-18	1.70e-1	6788	37.21	1.88e-1	10241	38.77

Con los datos obtenidos en la Tabla 3.4, se presenta las curvas de BER en la Figura 3.6 en una escala semilogarítmica y las curvas de EVM en la Figura 3.7 en una escala decimal. Para cada gráfica se muestra cuatro diagramas de constelaciones para una potencia menor y una potencia mayor, de esta forma se contrasta visualmente los resultados. En la Figura 3.6, se puede observar que al trabajar con 16 niveles de modulación, el BER es aceptable hasta una potencia de -7 dBm obteniendo 29 bits errados en UFMC y hasta -6 dBm con 99 bits errados en GFDM. Por arriba de esa potencia, el BER se hace más pequeño hasta llegar a 0 solo en UMFC y hasta $1.84e-5$ en GFDM, indicando que aún existe un intervalo en que se tiene una transmisión de buena calidad. Los diagramas de constelaciones indican que en una potencia mayor, se distinguen los 16 estados de la modulación, por lo que la señal aún puede ser recuperada sin errores.

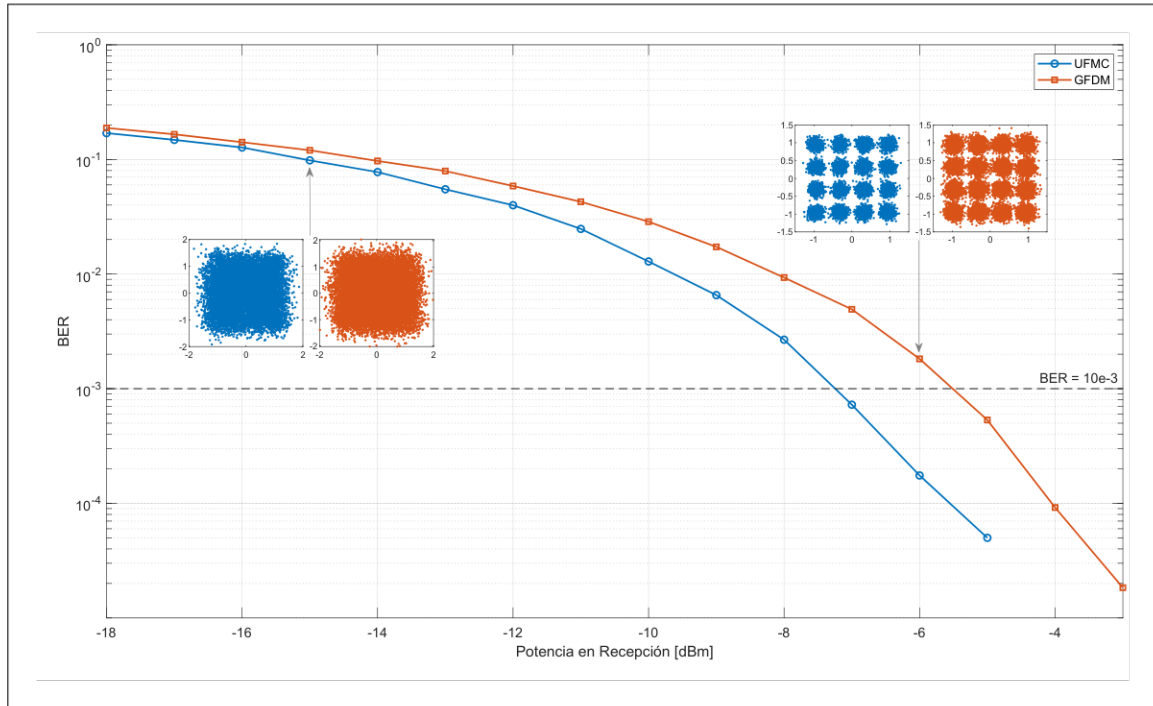


Figura 3.6: Potencia óptica de recepción vs. BER para la modulación 16-QAM.

En la Figura 3.7, el EVM presenta un valor aceptable hasta una potencia de -5 dBm en UFMC y solo con -3 dBm en GFDM. Por debajo de esa potencia, el EVM crece relativamente, lo que indica que los símbolos están separados del sistema de referencia 16-QAM. En este esquema de modulación, también se logra apreciar que la forma de onda UFMC presenta mejor rendimiento que GFDM.

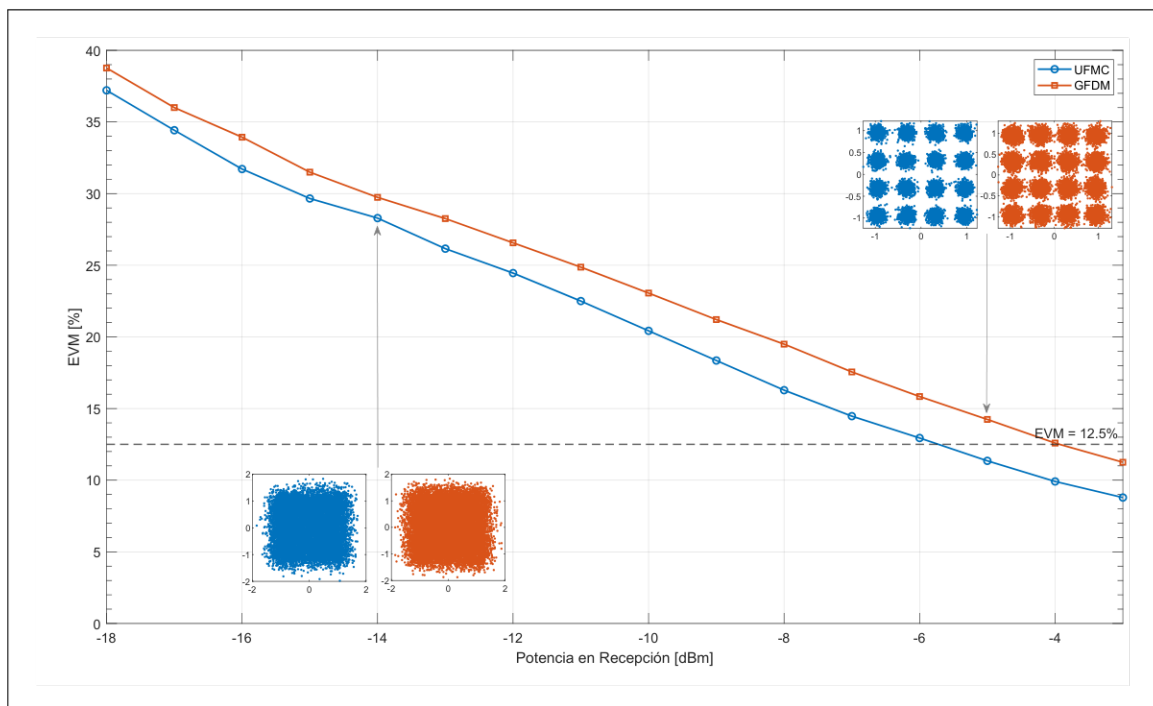


Figura 3.7: Potencia óptica de recepción vs. EVM para la modulación 16-QAM.

3.1.3.3 Resultados obtenidos al utilizar 64-QAM

Los resultados obtenidos al trabajar con el esquema de modulación 64-QAM se muestran en la Tabla 3.5. El rango de potencia óptica en la recepción es desde -18 dBm hasta -3 dBm obteniendo 16 mediciones para cada forma de onda. Para el BER se considera que el número total de bits transmitidos para la señal UFMC es de 60000 mientras que para la señal GFDM es de 81600. De acuerdo con la Tabla 3.1, se requiere como máximo un EVM de 8 % y un BER de $10e-3$.

Tabla 3.5: Mediciones de potencia óptica, BER y EVM para la modulación 64-QAM.

Potencia óptica en recepción [dBm]	BER (UFMC)	Bits errados (UFMC)	EVM [%] (UFMC)	BER (GFDM)	Bits errados (GFDM)	EVM [%] (GFDM)
-3	1.15e-3	69	7.42	1.51e-2	1235	10.42
-4	2.62e-3	157	8.40	2.39e-2	1954	11.18
-5	7.42e-3	445	9.48	3.58e-2	2919	11.92
-6	1.61e-2	966	10.55	4.94e-2	4034	12.51
-7	2.71e-2	1626	11.42	6.41e-2	5230	13.11
-8	4.31e-2	2588	12.25	7.93e-2	6467	13.66
-9	5.85e-2	3512	13.02	9.62e-2	7849	14.18
-10	7.73e-2	4635	13.69	1.15e-1	9399	14.74
-11	1.01e-1	6030	14.18	1.33e-1	10883	15.51
-12	1.19e-1	7126	14.97	1.51e-1	12299	16.48
-13	1.42e-1	8496	15.93	1.72e-1	14075	17.52
-14	1.66e-1	9941	17.00	1.96e-1	16023	18.92
-15	1.93e-1	11552	18.62	2.18e-1	17758	20.66
-16	2.20e-1	13211	20.83	2.39e-1	19477	22.42
-17	2.43e-1	14582	23.81	2.64e-1	21521	24.44
-18	2.65e-1	15910	26.18	2.85e-1	23260	27.81

Con los datos obtenidos en la Tabla 3.5, se presenta las curvas de BER en la Figura 3.8 en una escala semilogarítmica y las curvas de EVM en la Figura 3.9 en una escala decimal. Para cada gráfica se muestra cuatro diagramas de constelaciones para una potencia menor y una potencia mayor, de esta forma se contrasta visualmente los resultados. En la Figura 3.8, se puede observar que al trabajar con 64 niveles de modulación, el BER ya no es aceptable en ninguna potencia, siendo únicamente el más cercano de $1.15e-3$ con 69 bits errados en UFMC. Aquí ya se logra visualizar que las curvas de UFMC y GFDM comienzan a separarse entre sí para las potencias mayores. En este orden de modulación, ya no se tiene una transmisión de buena calidad. Además, los diagramas de constelaciones indican que en una potencia mayor, se distinguen con dificultad los 64 estados de la modulación, por lo que la señal se puede recuperar pero con errores.

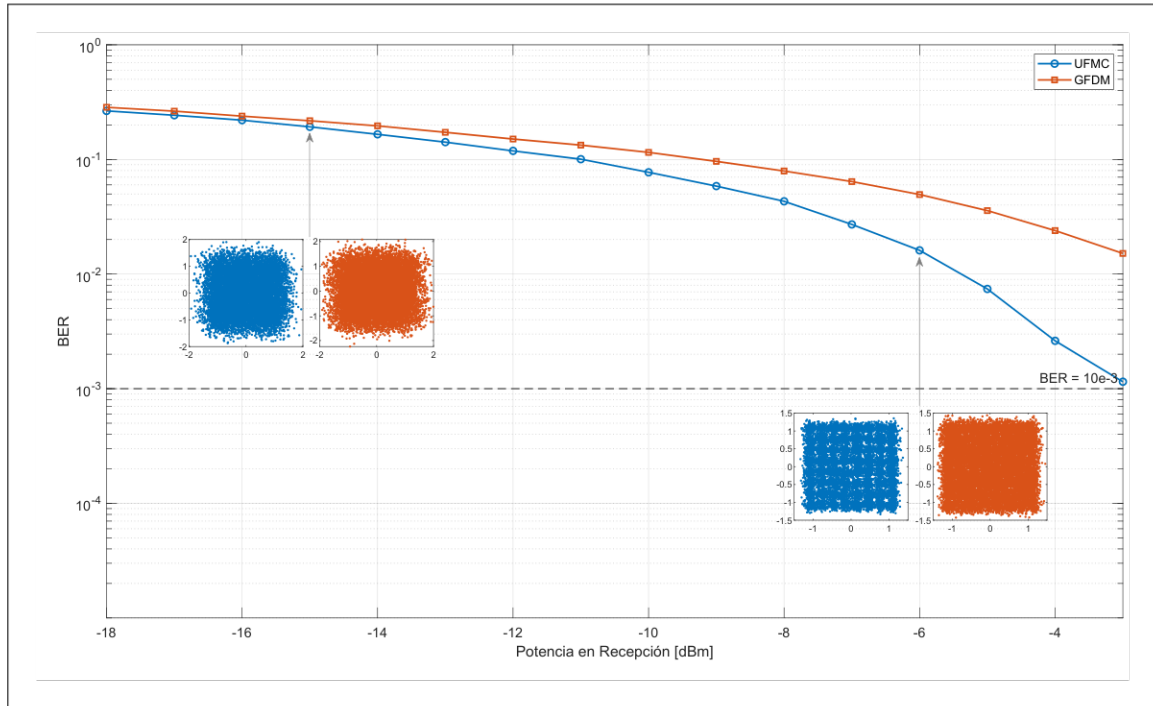


Figura 3.8: Potencia óptica de recepción vs. BER para la modulación 64-QAM.

En la Figura 3.9, el EVM presenta un valor aceptable solo en -3 dBm para UFMC y en ningún caso para GFDM. Por debajo de esa potencia, el EVM aumenta considerablemente, lo que indica que los símbolos están dispersándose del sistema de referencia 64-QAM. Aquí es apreciable que la forma de onda UFMC aún tiene mejor rendimiento que GFDM.

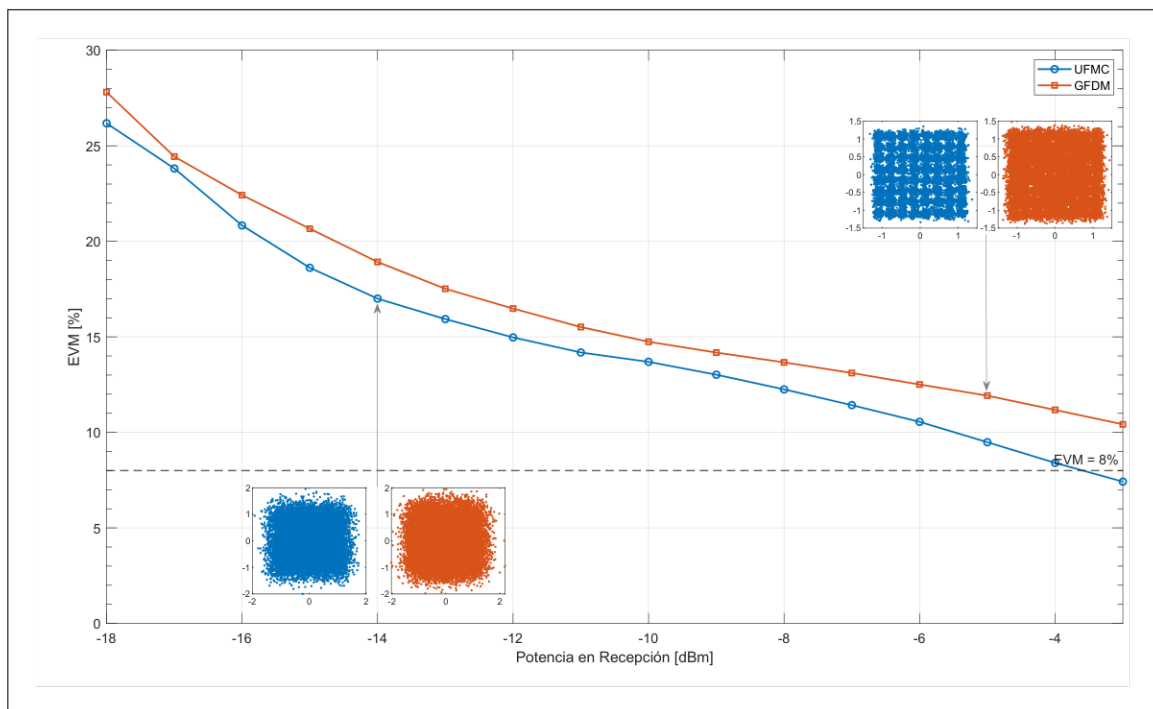


Figura 3.9: Potencia óptica de recepción vs. EVM para la modulación 64-QAM.

3.1.3.4 Resultados obtenidos al utilizar 256-QAM

Los resultados obtenidos al trabajar con el esquema de modulación 256-QAM se muestran en la Tabla 3.6. El rango de potencia óptica en la recepción es desde -18 dBm hasta -3 dBm obteniendo 16 mediciones para cada forma de onda. Para el BER se considera que el número total de bits transmitidos para la señal UFMC es de 80000 mientras que para la señal GFDM es de 108800. De acuerdo con la Tabla 3.1, se requiere como máximo un EVM de 3.5% y un BER de $10e-3$.

Tabla 3.6: Mediciones de potencia óptica, BER y EVM para la modulación 256-QAM.

Potencia óptica en recepción [dBm]	BER (UFMC)	Bits errados (UFMC)	EVM [%] (UFMC)	BER (GFDM)	Bits errados (GFDM)	EVM [%] (GFDM)
-3	2.14e-2	1714	5.56	7.92e-2	8616	6.72
-4	3.34e-2	2672	5.98	9.32e-2	10136	6.81
-5	4.89e-2	3913	6.26	1.09e-1	11879	7.07
-6	6.60e-2	5276	6.47	1.25e-1	13598	7.27
-7	8.34e-2	6671	6.73	1.45e-1	15569	7.58
-8	1.01e-1	8069	6.87	1.60e-1	17372	7.88
-9	1.23e-1	9833	7.24	1.81e-1	19680	8.41
-10	1.45e-1	11630	7.60	1.99e-1	21638	9.07
-11	1.71e-1	13663	8.16	2.19e-1	23818	9.73
-12	1.96e-1	15664	8.98	2.36e-1	25720	10.63
-13	2.18e-1	17408	9.91	2.55e-1	27757	11.99
-14	2.46e-1	19659	11.33	2.73e-1	29743	13.20
-15	2.67e-1	21339	13.78	2.92e-1	31769	15.00
-16	2.92e-1	23368	15.57	3.10e-1	33755	17.14
-17	3.11e-1	24857	18.10	3.26e-1	35521	19.38
-18	3.29e-1	26311	21.21	3.42e-1	37182	22.19

Con los datos obtenidos en la Tabla 3.6, se presenta las curvas de BER en la Figura 3.10 en una escala semilogarítmica y las curvas de EVM en la Figura 3.11 en una escala decimal. Para cada gráfica se muestra cuatro diagramas de constelaciones para una potencia menor y una potencia mayor, de esta forma se contrasta visualmente los resultados. En la Figura 3.10, se puede observar que al trabajar con 256 niveles de modulación, ya no se tiene ningún valor de BER aceptable en las dos formas de onda. Se logra visualizar que las curvas tienden a separarse entre sí en las potencias mayores. La transmisión con 256-QAM es de mala calidad en este rango de potencias. Además, los diagramas de constelaciones indican que en una potencia mayor, no es posible distinguir los 256 estados de la modulación, por lo que la señal no es recuperable sin errores.

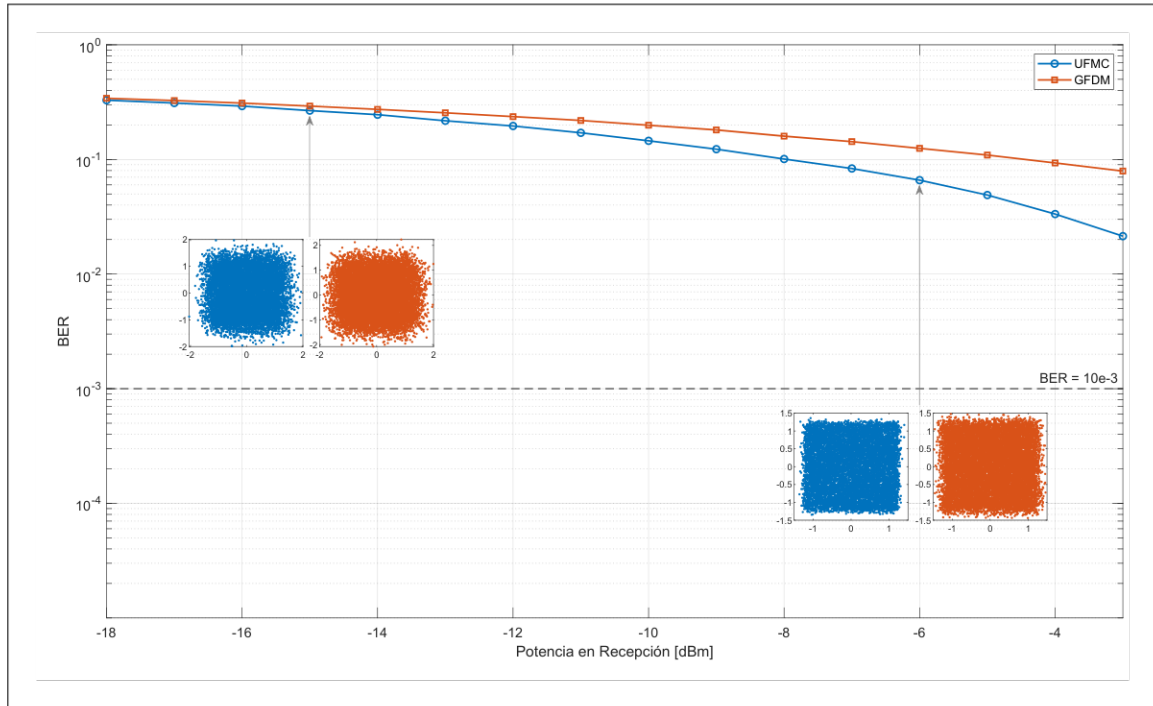


Figura 3.10: Potencia óptica de recepción vs. BER para la modulación 256-QAM.

En la Figura 3.11, el EVM no presenta ningún valor aceptable en ninguna potencia, aunque estas curvas tienden a llegar a un valor cercano a 6%. En las potencias menores, el EVM también aumenta considerablemente, lo que indica que los símbolos están muy dispersos del sistema de referencia 256-QAM. Para este orden de modulación, la forma de onda UFMC aún conserva un mejor rendimiento que GFDM.

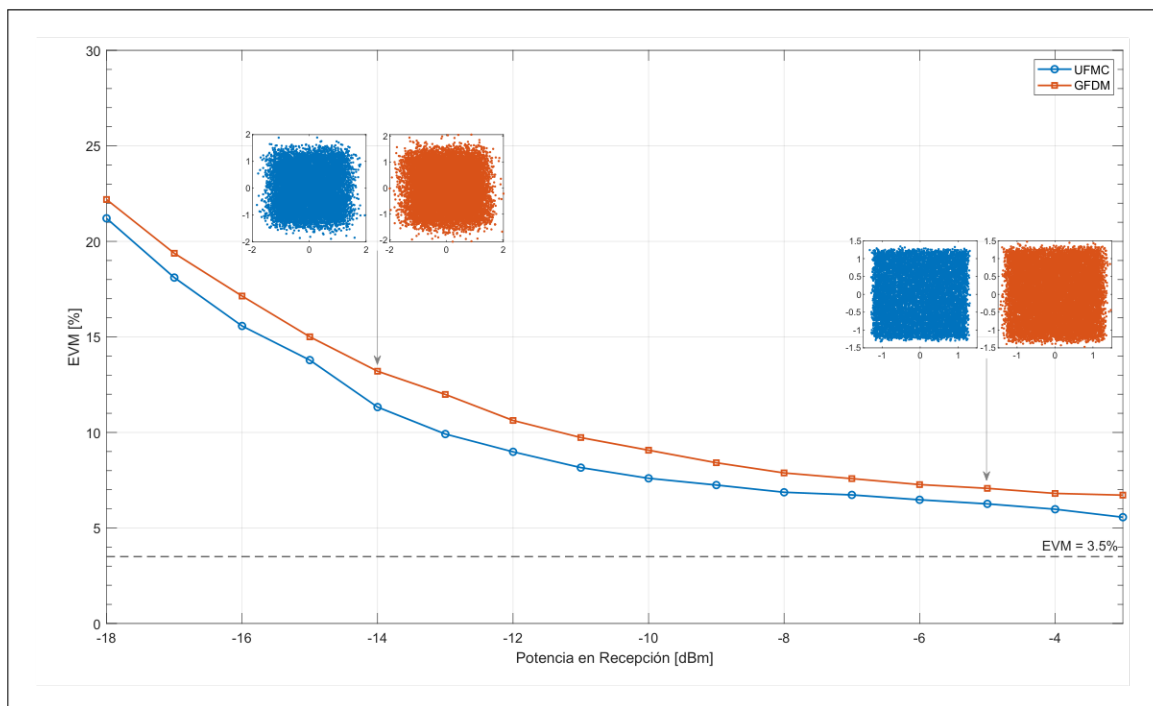


Figura 3.11: Potencia óptica de recepción vs. EVM para la modulación 256-QAM.

3.1.3.5 Comparación de resultados

Con el fin de sintetizar los resultados obtenidos, se presenta en la Figura 3.12 una comparación de las curvas de BER y en la Figura 3.13 una comparación de las curvas de EVM para cada orden de modulación en las formas de onda UFMC y GFDM.

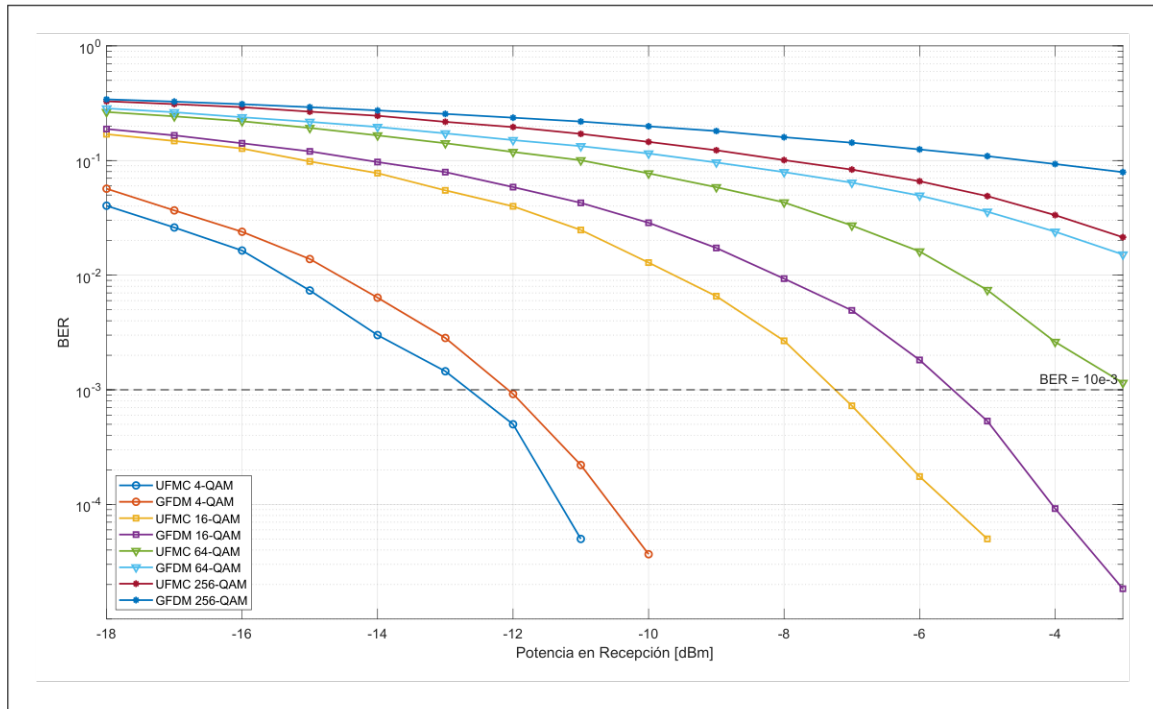


Figura 3.12: Potencia óptica de recepción vs. BER.

Es notable que UFMC presenta un mejor rendimiento en todos los casos con respecto a GFDM, sin embargo, la señal recuperada posee un BER menor a 0.001 solamente en las modulaciones 4-QAM y 16-QAM, mientras que en las otras modulaciones, la señal sufre bastante degradación para que puede ser recuperada bajo los requerimientos del BER. El rendimiento superior de UFMC es debido a la utilización de los filtros por cada sub-banda, de esta forma, cada conjunto de sub-portadoras posee su propio filtro y su ecualización correspondiente.

Como se mencionó anteriormente, GFDM trata a todas las sub-portadoras como si fuera una sola banda, por lo que los datos son más propensos a degradarse entre sí. Esto se podría mitigar con la utilización de un CP, tal como en OFDM. La consecuencia principal de esta modificación es el aumento en componentes en la PSD, haciendo que la señal ya no sea tan eficiente en cuanto al ancho de banda. En el caso de las modulaciones de orden superior, tanto UFMC como GFDM presentan elevadas tasas de BER, que no son admisibles en un entorno PON.

A medida que aumenta el orden de modulación, el BER aumenta, es decir que se tienen más bits errados. Esto es debido a que se manejan muchos más estados de modulación, por lo que es más probable que un símbolo se aleje de su ubicación original en el diagrama de constelaciones. Los estados de modulación son más cercanos entre sí, a diferencia de los órdenes bajos, donde es más fácil distinguir la posición original de un símbolo transmitido.

En cuanto a las curvas de EVM presentadas en la Figura 3.13, también es notable el mejor rendimiento de UFMC comparado a GFDM. Esto es debido a la utilización de los filtros por sub-banda. Mientras la potencia óptica en el transmisor va disminuyendo, la señal se degrada más y es propensa a ser distorsionada por el ruido en la conversión opto-eléctrica. Esto puede solucionarse aplicando un filtro a la salida del fotodetector, donde pase la señal eléctrica antes de ser muestreada en el DSA.

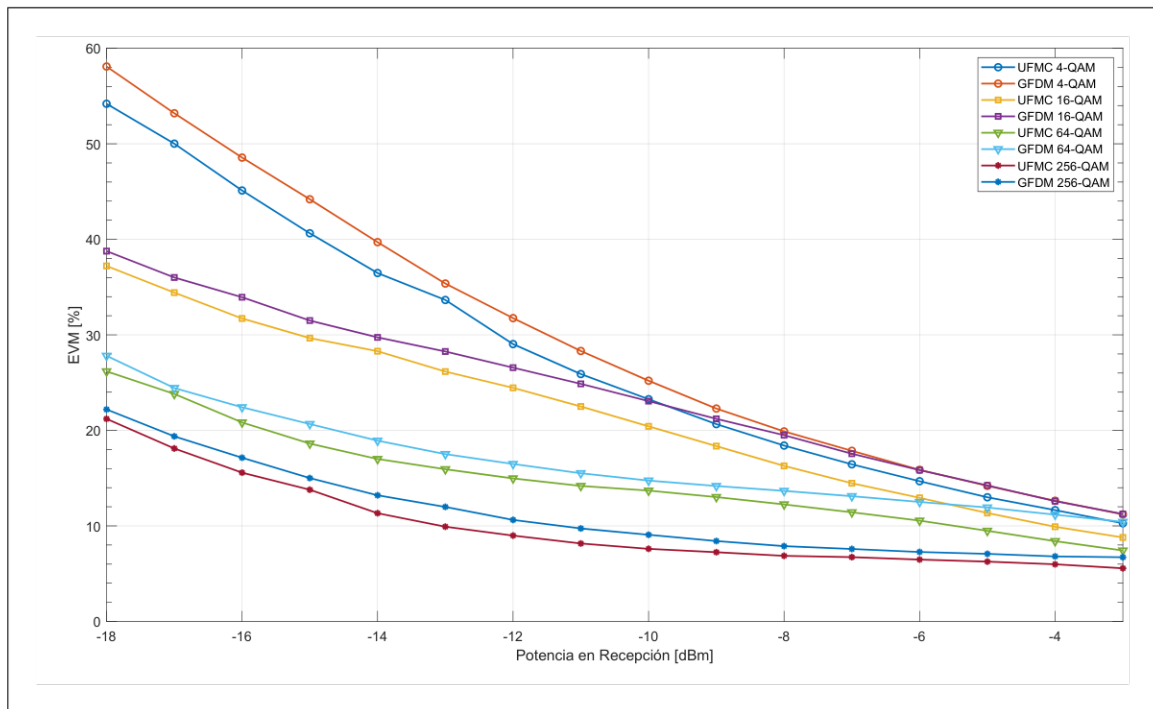


Figura 3.13: Potencia óptica de recepción vs. EVM.

Conforme aumente el orden de modulación, el requerimiento de EVM disminuye. Esto es a la separación de los símbolos en el diagrama de constelaciones. Si se maneja mayor cantidad de niveles de modulación, los símbolos van a estar menos separados entre sí. Es por esto que las curvas del EVM tienden a estabilizarse en un valor menor cada que aumenta el orden de modulación.

3.2 CONCLUSIONES

- ❑ En el presenta trabajo integración curricular se logró realizar la implementación física de un sistema RoF en el contexto de las redes móviles 5G para analizar las formas de onda UFMC y GFDM a través de las métricas del BER y EVM bajo la técnica de modulación M-QAM. La parte de generación y procesamiento de la señal se realizó con Matlab, mientras que el canal óptico de 20 km de longitud se armó con equipos y elementos disponibles en el laboratorio, bajo una velocidad de 10 Gbps y con una longitud de onda de 1550 nm.
- ❑ Para un rango de potencias admitidas por el fotodetector que varían desde -18 a -3 dBm, se realizó la transmisión individual de señales UFMC y GFDM bajo los esquemas de modulación 4/16/64/256-QAM, en donde se modificó el nivel de disminución potencia con ayuda de un atenuador variable desde 8 a 23 dB. Se trabajó con 16 valores para las 4 técnicas por cada señal, por lo que en total se obtuvieron 128 señales recibidas. De esto se obtuvo las gráficas de BER y EVM en función de la potencia óptica que indicaron un mejor rendimiento de la forma de onda UFMC.
- ❑ Los resultados mostraron que, mientras aumenta la potencia óptica en recepción, el BER disminuye progresivamente para las dos formas de onda según la modulación. En 4-QAM y 16-QAM, el BER pudo mantenerse por debajo de $10e^{-3}$ hasta incluso llegar a 0 lo que indica una buena calidad de transmisión. Además, cuando se maneja un mayor orden de modulación, la señal tiende a degradarse más, por lo que la tasa de disminución del BER es más pequeña en comparación con 4 y 16-QAM y no logra bajar del límite de 0.001.
- ❑ El EVM posee el mismo comportamiento que el BER, es decir, que al trabajar con niveles de modulación superiores como 64-QAM y 256-QAM, las curvas tienden a estar entre 10 y 20 % lo cual no significa que hay mucha variación. Lo contrario sucede en 4-QAM y 16-QAM, donde las curvas del EVM llegan hasta 60 %, debido a que los símbolos se encuentran más separados en el diagrama de constelaciones. Sin embargo, esto no significa que la transmisión es mejor con un EVM más alto o bajo, dado que depende de la modulación.
- ❑ En el sistema implementado, las transmisiones realizadas admiten como máximo la técnica 16-QAM para que los valores de BER y EVM permanezcan por debajo de los niveles adecuados. Sin embargo, es notable que en todos los casos, UFMC brinda

un mejor rendimiento que GFDM, tanto en el BER como el EVM. Esto debido a la utilización de los filtros de sub-banda que aplica UFMC.

3.3 RECOMENDACIONES

- ❑ Verificar los niveles de potencia óptica entre cada conexión con la ayuda de un medidor de potencia óptica (OPM: Optical Power Meter), esto con el fin de evitar introducir potencias superiores a las soportadas, especialmente en el fotodetector, cuya potencia máxima soportada es -3 dBm, evitando dañarlo.
- ❑ Controlar el presupuesto de potencia que se maneja dentro del canal óptico recordando que los conectores atenúan la señal si se encuentran sucios, por lo que es indispensable realizar su limpieza previo a realizar la transmisión de las señales. En el caso de las férulas se aplica alcohol isopropílico y en el de los conectores se utiliza un lápiz de limpieza.
- ❑ Mantener un mismo número de bits transmitidos y una misma cantidad de subportadoras en las formas de onda UFMC y GFDM para cada nivel de modulación, esto con el fin de equilibrar los resultados obtenidos y realizar una comparación más precisa bajo las mismas condiciones.
- ❑ Determinar las condiciones del filtro Dolph-Chebyshev, cantidad y tamaño de sub-bandas que permitan mejorar al máximo el rendimiento de la señal UFMC, reduciendo el BER a menos de $10e-3$ y el EVM a sus valores requeridos para cada orden de modulación.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] V. Peñaranda, K. Puerto y J. Ramírez, "Sistemas de radio sobre fibra y redes 5G: perspectiva y aplicaciones," es, *Ingeniare*, n.º 33, págs. 73-88, ago. de 2022, Number: 33, ISSN: 2390-0504. DOI: <https://doi.org/10.18041/1909-2458/ingeniare.33.9732>. dirección: <https://revistas.unilibre.edu.co/index.php/ingeniare/article/view/9732>.
- [2] L. Flores y L. Toscano, "Sistema de transmisión multiportadora mediante multiplexación por división de frecuencia generalizado (GFDM)," Accepted: 2017-04-13, bachelorThesis, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, ene. de 2017. dirección: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/14023>.
- [3] S. Acquah, A. Krampah-Nkoom y M. O. Adjei, "Performance of the Candidate Modulation Waveforms for 5G Communication Systems," *International Journal of Scientific and Research Publications (IJSRP)*, vol. 10, n.º 06, págs. 597-644, jun. de 2020, ISSN: 22503153. DOI: <http://dx.doi.org/10.29322/IJSRP.10.06.2020.p10274>. dirección: <http://www.ijsrp.org/research-paper-0620.php?rp=P10210162>.
- [4] T. Hwang, C. Yang, G. Wu, S. Li y G. Ye Li, "OFDM and Its Wireless Applications: A Survey," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 58, n.º 4, págs. 1673-1694, mayo de 2009, Conference Name: IEEE Transactions on Vehicular Technology, ISSN: 1939-9359. DOI: 10.1109/TVT.2008.2004555. dirección: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4607239>.
- [5] Rohde-Schwarz, *5G Waveform Candidates*, jun. de 2016. dirección: https://www.rohde-schwarz.com/lat/aplicaciones/candidatos-a-formas-de-onda-5g-nota-de-aplicacion_56280-267585.html.
- [6] A. Osseiran, J. F. Monserrat y P. Marsch, eds., *5G Mobile and Wireless Communications Technology*. Cambridge: Cambridge University Press, jun. de 2016, ISBN: 978-1-107-13009-8. DOI: 10.1017/CBO9781316417744. dirección: <https://www.cambridge.org/core/books/5g-mobile-and-wireless-communications-technology/1FB952899CAEFC7B05F6A334C9ECDA8>.
- [7] X. Wang, T. Wild y F. Schaich, "Filter Optimization for Carrier-Frequency- and Timing-Offset in Universal Filtered Multi-Carrier Systems," en *2015 IEEE 81st Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, Glasgow, UK: IEEE, mayo de 2015, págs. 1-6, ISBN: 978-1-4799-8088-8. DOI: 10.1109/VTCSpring.2015.7145842. dirección: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7145842>.

- [8] A. Crespo, "Análisis de prestaciones de acceso radio ortogonal y no-ortogonal para redes inalámbricas 5G," masterThesis, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California, ago. de 2020. dirección: <http://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1007/3293>.
- [9] A. Zin, M. Bongsu, S. Idrus y N. Zulkifli, "An overview of radio-over-fiber network technology," en *International Conference On Photonics 2010*, ISSN: 2330-5665, Langkawi, Malaysia: IEEE, jul. de 2010, págs. 1-3. DOI: 10.1109/ICP.2010.5604429. dirección: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5604429>.
- [10] Y. Huo, X. Dong, W. Xu y M. Yuen, "Cellular and WiFi Co-design for 5G User Equipment," en *2018 IEEE 5G World Forum (5GWF)*, Silicon Valley, CA, USA: IEEE, jul. de 2018, págs. 256-261. DOI: 10.1109/5GWF.2018.8517059. dirección: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8517059>.
- [11] S. Speicher, S. Sirotkin, S. Palat y A. Davydov, "5G System Overview," en *5G Radio Access Network Architecture: The Dark Side of 5G*, John Wiley & Sons, Ltd, feb. de 2021, págs. 37-122, ISBN: 978-1-119-55092-1. dirección: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9781119550921.ch3>.
- [12] P.-H. Kuo y A. Mourad, "Millimeter wave for 5G mobile fronthaul and backhaul," en *2017 European Conference on Networks and Communications (EuCNC)*, Oulu: IEEE, jun. de 2017, págs. 1-5, ISBN: 978-1-5386-3873-6. DOI: 10.1109/EuCNC.2017.7980750. dirección: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7980750>.
- [13] A. Viorreta, "Toward to design of 5G optical communications," Bachelor Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, jun. de 2017. dirección: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/107304>.
- [14] A. Ng´Oma, "Radio-over-fibre technology for broadband wireless communication systems," Tesis doct., Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven, jun. de 2005. dirección: [https://research.tue.nl/en/publications/radiooverfibre-technology-for-broadband-wireless-communication-systems\(3b3ba448-60c3-4a3b-bbf6-0bb0ae222581\).html](https://research.tue.nl/en/publications/radiooverfibre-technology-for-broadband-wireless-communication-systems(3b3ba448-60c3-4a3b-bbf6-0bb0ae222581).html).
- [15] J. Granada, C. Serpa, G. Varón y N. González, "Toward Next Generation Broadband Radio-over-Fiber Systems: Technological," *Ingeniería y Desarrollo*, vol. 29, n.º 2, págs. 243-265, 2011, ISSN: 0122-3461. dirección: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=85220757008>.

- [16] J. Liu, *Amplifier-based tuneable RF predistortion for radio-over-fibre systems*. dirección: https://users.encs.concordia.ca/~gcowan/research_linearizedROF.html.
- [17] B. Ayala, "Implementación del Método de Cambio de Fase para la Medición de Dispersión Cromática en Fibras para Telecomunicaciones," Tesis de maestría., Centro de Investigaciones en Óptica, A.C., León, Guanajuato, México, dic. de 2011. dirección: <http://cio.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1002/884>.
- [18] J. Asensi, "Design of Passive Optical Network," Tesis de maestría., Universidad Politécnica de Valencia, mayo de 2011. dirección: <https://core.ac.uk/reader/30297690>.
- [19] H. Gupta, P. Gupta, P. Kumar, A. K. Gupta y P. Kumar M., "Passive Optical Networks: Review and Road Ahead," en *TENCON 2018 - 2018 IEEE Region 10 Conference*, Jeju, Korea: IEEE, oct. de 2018, págs. 919-924, ISBN: 978-1-5386-5457-6. DOI: 10.1109/TENCON.2018.8650204. dirección: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8650204>.
- [20] B. Celi, "Análisis técnico comparativo de las redes de acceso XGS-PON versus NG-PON2," bachelorThesis, Escuela Politécnica Nacional, Quito, feb. de 2022. dirección: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/22654>.
- [21] F. Schaich y T. Wild, "Waveform contenders for 5G — OFDM vs. FBMC vs. UFMC," en *2014 6th International Symposium on Communications, Control and Signal Processing (ISCCSP)*, Athens, Greece: IEEE, mayo de 2014, págs. 457-460. DOI: 10.1109/ISCCSP.2014.6877912. dirección: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6877912>.
- [22] G. Kongara, C. He, L. Yang y J. Armstrong, "A Comparison of CP-OFDM, PCC-OFDM and UFMC for 5G Uplink Communications," *IEEE Access*, vol. 7, págs. 157 574-157 594, 2019, Conference Name: IEEE Access, ISSN: 2169-3536. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2949792. dirección: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8884078>.
- [23] D. Jiang y G. Liu, "An Overview of 5G Requirements," en *5G Mobile Communications*, W. Xiang, K. Zheng y X. Shen, eds., 1.^a ed., Springer Cham, 2017, págs. 3-26, ISBN: 978-3-319-34208-5. DOI: 10.1007/978-3-319-34208-5_1.
- [24] G. Bochechka, V. Tikhvinskiy, I. Vorozhishchev, A. Aitmagambetov y B. Nurgozhin, "Comparative analysis of UFMC technology in 5G networks," en *2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*, ISSN: 2380-6516,

- Astana, Kazakhtan: IEEE, jun. de 2017, págs. 1-6. DOI: 10.1109/SIBCON.2017.7998465. dirección: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7998465>.
- [25] S. M. Sadinov, "Simulation study of M-ARY QAM modulation techniques using Matlab/Simulink," en *2017 40th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO)*, Opatija, Croatia: IEEE, mayo de 2017, págs. 547-554. DOI: 10.23919/MIPRO.2017.7973486. dirección: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7973486>.
- [26] T. Youssef y E. Abdelfattah, "Performance evaluation of different QAM techniques using Matlab/Simulink," en *2013 IEEE Long Island Systems, Applications and Technology Conference (LISAT)*, Farmingdale, NY, USA: IEEE, mayo de 2013, págs. 1-5. DOI: 10.1109/LISAT.2013.6578237. dirección: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6578237>.
- [27] Y.-H. Chang y S.-Y. Kuo, "A Gain/Efficiency-Improved Serial-Parallel Switched-Capacitor Step-Up DC-DC Converter," *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 60, n.º 10, págs. 2799-2809, oct. de 2013, Conference Name: IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, ISSN: 1558-0806. DOI: 10.1109/TCSI.2013.2248833. dirección: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6612730>.
- [28] W. Chew y J. Song, "Fast Fourier transform of sparse spatial data to sparse Fourier data," en *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, vol. 4, Salt Lake City, UT, USA: IEEE, jul. de 2000, págs. 2324-2327. DOI: 10.1109/APS.2000.874959. dirección: <https://ieeexplore.ieee.org/document/874959>.
- [29] K. Puerto, B. Medina y L. Camargo, "Efecto de la dispersión cromática en un sistema híbrido," *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada (RCTA)*, vol. 2, n.º 24, págs. 59-63, 2014, Number: 24, ISSN: 2500-8625. DOI: 10.24054/rcta.v2i24.1206. dirección: <https://ojs.unipamplona.edu.co/index.php/rcta/article/view/1206>.
- [30] A. Uruchima, "Análisis del desempeño de sistemas OFDM con diferentes modulaciones usando Simulink.," Bachelor Thesis, Universidad Santiago de Guayaquil, Guayaquil, sep. de 2016. dirección: <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/6608>.
- [31] V. Vakilian, T. Wild, F. Schaich, S. Brink y J.-F. Frigon, "Universal-filtered multi-carrier technique for wireless systems beyond LTE," en *2013 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, ISSN: 2166-0077, Atlanta, GA, USA: IEEE, dic. de 2013, págs. 223-228.

DOI: 10.1109/GLOCOMW.2013.6824990. dirección: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6824990>.

- [32] A. Hammoodi, L. Audah y M. A. Taher, "Green Coexistence for 5G Waveform Candidates: A Review," *IEEE Access*, vol. 7, págs. 10 103-10 126, 2019, Conference Name: IEEE Access, ISSN: 2169-3536. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2891312. dirección: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8604044>.
- [33] M. Saad, A. Al-Ghouwayel y H. Hijazi, "UFMC Transceiver Complexity Reduction," en *2018 25th International Conference on Telecommunications (ICT)*, jun. de 2018, págs. 295-301. DOI: 10.1109/ICT.2018.8464863. dirección: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8464863>.
- [34] S. Geng, X. Xiong, L. Cheng, X. Zhao y B. Huang, "UFMC system performance analysis for discrete narrow-band private networks," en *2015 IEEE 6th International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation, and EMC Technologies (MAPE)*, oct. de 2015, págs. 303-307. DOI: 10.1109/MAPE.2015.7510319. dirección: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7510319> (visitado 07-02-2024).
- [35] A. Surampudi, R. Singh, G. Faulkner, D. O'Brien y S. Collins, "Raised Cosine Pulse Shaping for Pre-equalized Optical Wireless Links," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 33, n.º 16, págs. 912-915, ago. de 2021, Conference Name: IEEE Photonics Technology Letters, ISSN: 1941-0174. DOI: 10.1109/LPT.2021.3069115. dirección: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9387396> (visitado 07-02-2024).
- [36] K. Aissaoui, S. Mhatli y R. Attia, "High Data Rate Multiband GFDM Over Long-haul Standard Single Mode Fiber Communication," en *2019 15th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference (IWCMC)*, ISSN: 2376-6506, Tangier, Morocco: IEEE, jun. de 2019, págs. 1764-1766. DOI: 10.1109/IWCMC.2019.8766716. dirección: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8766716>.
- [37] Y. Raji, T. Dahawi, Z. Yusoff y J. Senior, "60GHZ MIMO-GFDM RoF Over OFDM-PON," en *2022 IEEE 9th International Conference on Photonics (ICP)*, ISSN: 2330-5665, Kuala Lumpur, Malaysia: IEEE, ago. de 2022, págs. 18-19. DOI: 10.1109/ICP53600.2022.9912486. dirección: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9912486>.
- [38] S. Neelam y P. Sahu, "Error performance of QAM GFDM waveform with CFO under AWGN and TWDP fading channel," en *2019 National Conference on Communications (NCC)*, Bangalore, India: IEEE, feb. de 2019, págs. 1-6. DOI: 10.1109/NCC.2019.8732207. dirección: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8732207>.

- [39] J. Ren, B. Liu, L. Zhang et al., "Nonuniform QAM GFDM RoF system based on probabilistic shaping with Huffman code," en *2018 Asia Communications and Photonics Conference (ACP)*, Hangzhou, China: IEEE, oct. de 2018, págs. 1-3. DOI: 10.1109/ACP.2018.8596289. dirección: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8596289> (visitado 07-02-2024).
- [40] L. Watkins, P. Lane y J. O'Reilly, "Broadband pulse shaping microstrip filters for gigabit optical communications," en *1990 IEE Colloquium on Digital and Analogue Filters and Filtering Systems (Digest No. 1990/091)*, London, UK: IET, mayo de 1990, págs. 13/1-13/3. dirección: <https://ieeexplore.ieee.org/document/190264>.
- [41] E. Herawati, A. Isnawati y K. Ni'amah, "Analysis of GFDM-OQAM Performance Using Zero Forcing Equalization," en *2021 IEEE International Conference on Communication, Networks and Satellite (COMNETSAT)*, Purwokerto, Indonesia: IEEE, jul. de 2021, págs. 135-140. DOI: 10.1109/COMNETSAT53002.2021.9530809. dirección: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9530809>.
- [42] M. Dávila, "Análisis de la integración de tecnologías de radio sobre fibra en redes móviles: Caso de estudio técnica UFMC.," bachelorThesis, Escuela Politécnica Nacional, Quito, oct. de 2022. dirección: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/23249>.
- [43] K. Casillas, "Análisis de la integración de tecnologías de radio sobre fibra en redes móviles: Caso de estudio técnica GFDM.," bachelorThesis, Escuela Politécnica Nacional, Quito, abr. de 2023. dirección: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/24293>.
- [44] V. Kopparty, V. Manjunath, K. Subramaniam, P. Jain y V. M. Gadag, "Efficient methods for bearer traffic flow migration in NG-RAN," en *2018 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, ISSN: 1558-2612, Barcelona, Spain: IEEE, abr. de 2018, págs. 1-6. DOI: 10.1109/WCNC.2018.8377065. dirección: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8377065>.
- [45] J. Granada, J. Álvarez, C. Serpa, G. Varón y N. Guerrero, "Análisis del desempeño de la transmisión de datos en banda base y RF sobre redes PON de largo alcance," *ITECKNE: Innovación e Investigación en Ingeniería*, vol. 9, n.º 1, págs. 57-66, 2012, ISSN: 2339-3483, 1692-1798. dirección: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4991593>.
- [46] L. FOCC Fibra CO., *De O a L: la evolución de las bandas de longitud de onda óptica - Exposición - Focc Technology Co., Ltd*, jul. de 2019. dirección: <https://www.fibresplitter.com/info/from-o-to-l-the-evolution-of-optical-waveleng-37122160.html>.

- [47] ITU, *ITU-T Recommendation database*. dirección: <https://www.itu.int/ITU-T/recommendations/rec.aspx?rec=13076&lang=en>.
- [48] L. Yu, "Matlab Programming Environment Based on Web," en *2018 IEEE 4th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC)*, Chongqing, China: IEEE, dic. de 2018, págs. 509-512. DOI: 10.1109/ITOEC.2018.8740716. dirección: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8740716>.
- [49] A. Technologies, *Agilent Technologies Spins Off Its Electronic Measurement Business, Keysight Technologies*, nov. de 2014. dirección: <https://www.investor.agilent.com/news-and-events/news/news-details/2014/Agilent-Technologies-Spins-Off-Its-Electronic-Measurement-Business-Keysight-Technologies/default.aspx>.
- [50] A. Technologies, *Software | Agilent*. dirección: <https://www.agilent.com/en/academia/corefacility/software-solutions>.
- [51] MathWorks, *Enteros pseudoaleatorios distribuidos de manera uniforme - MATLAB randi - MathWorks América Latina*. dirección: <https://la.mathworks.com/help/matlab/ref/randi.html>.
- [52] MathWorks, *Quadrature amplitude modulation (QAM) - MATLAB qammod - MathWorks América Latina*. dirección: <https://la.mathworks.com/help/comm/ref/qammod.html>.
- [53] H. M. Shariff, M. H. Fazalul Rahiman y M. Tajjudin, "Nonlinear system identification: Comparison between PRBS and Random Gaussian perturbation on steam distillation pilot plant," en *2013 IEEE 3rd International Conference on System Engineering and Technology*, Shah Alam, Malaysia: IEEE, ago. de 2013, págs. 269-274. DOI: 10.1109/ICSEngT.2013.6650183. dirección: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6650183>.
- [54] G. Al-Juboori, E. Tsimbaló, A. Doufexi y A. Nix, "A Comparison of OFDM and GFDM-Based MFSK Modulation Schemes for Robust IoT Applications," en *2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, Sydney, NSW, Australia, jun. de 2017, págs. 1-5. DOI: 10.1109/VTCSpring.2017.8108191. dirección: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8108191>.
- [55] Keysight, *N8241A Arbitrary Waveform Generator Synthetic Instrument Module | Keysight*. dirección: <https://www.keysight.com/us/en/assets/7018-01285/technical-overviews/5989-2595.pdf>.

- [56] A. Technologies, *Agilent N8241A/N8242A Arbitrary Waveform Generators*, USA, sep. de 2006. dirección: https://amsc.tamu.edu/AMSCLab/Manual_ArbWaveGen_N8241A.pdf.
- [57] IdPhotonics, *CoBrite MX Series*. dirección: <https://id-photonics.com/products-solutions/tunable-lasers/cobrite-portfolio/cobrite-mx>.
- [58] IdPhotonics, *CoBrite MX Series*. dirección: https://id-photonics.com/images/stories/PDF/Data_sheet_CBMX_series.pdf.
- [59] K.-P. Ho, *Phase-Modulated Optical Communication Systems*, National Taiwan University. Taiwan: Springer Science & Business Media, dic. de 2005, Google-Books-ID: XX4JRnE_ikC, ISBN: 978-0-387-25555-2.
- [60] R. Pradeep y N. Vijayakumar, "Performance analysis of Mach-Zehnder modulator in radio over fiber systems," *International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology (IJARET)*, vol. 7, n.º 5, págs. 45-52, oct. de 2016, ISSN: 0976-6499. dirección: <http://iaeme.com/Home/issue/IJARET?Volume=7&Issue=5>.
- [61] ThorLabs, *Lithium Niobate Electro-Optic Modulators, Fiber-Coupled (1260 nm - 1625 nm)*. dirección: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=3918.
- [62] Y. Kim, M. Lee, Y. Kim y K. Kim, "High-extinction-ratio directional-coupler-type polarization beam splitter with a bridged silicon wire waveguide," *Optics Letters*, vol. 43, n.º 14, págs. 3241-3244, jul. de 2018, ISSN: 1539-4794. DOI: 10.1364/OL.43.003241.
- [63] SilexFiber, *Cable Fibra Optica Monomodo SM G652D UIT-T G.652.D*. dirección: <https://silexfiber.com/producto/cable-fibra-optica-monomodo-sm-g652d/>.
- [64] HTF, *Clasificación y comparación de fibras monomodo G. 652 y G.655 - Conocimiento - Shenzhen HTFuture Co., Ltd*, jun. de 2021. dirección: <http://www.fiber-optical-transceivers.com/info/classification-and-comparison-of-g-652-and-g-57652315.html>.
- [65] M. Manion, *Encyclopedia of Optical Engineering*. American Library Association, jun. de 2004, vol. 43. dirección: <https://go.gale.com/ps/i.do?p=AONE&sw=w&issn=10949054&v=2.1&it=r&id=GALE%7CA121416134&sid=googleScholar&linkaccess=abs>.
- [66] D. Michalik, T. Stefaniuk y R. Buczyński, "Dispersion Management in Hybrid Optical Fibers," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 38, n.º 6, págs. 1427-1434, mar. de 2020. dirección: <https://opg.optica.org/jlt/abstract.cfm?uri=jlt-38-6-1427>.

- [67] H. Kogelnik, R. M. Jopson y L. E. Nelson, "Chapter 15 - Polarization-Mode Dispersion," en *Optical Fiber Telecommunications IV-B (Fourth Edition)*, ép. Optics and Photonics, I. P. Kaminow y T. Li, eds., Burlington: Academic Press, ene. de 2002, págs. 725-861. DOI: 10.1016/B978-012395173-1/50015-3. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123951731500153>.
- [68] *GAOTek Handheld Variable Optical Attenuator - GAO Tek*. dirección: <https://gaotek.com/product/gaotek-handheld-variable-optical-attenuator/>.
- [69] *GAOTek Handheld Variable Optical Attenuator - GAO Tek*. dirección: <https://gaotek.com/gaotek-pdf/C0270001tek-GAO-VOA-103.pdf>.
- [70] J.-P. Colinge y C. A. Colinge, *Physics of Semiconductor Devices*. Springer Science & Business Media, oct. de 2005, ISBN: 978-0-387-28523-8.
- [71] B. Butun, T. Tut, E. Ulker, T. Yelboga y E. Ozbay, "High-performance visible-blind GaN-based p-i-n photodetectors," *Applied Physics Letters*, vol. 92, n.º 3, pág. 033 507, ene. de 2008, ISSN: 0003-6951. DOI: 10.1063/1.2837645. dirección: <https://doi.org/10.1063/1.2837645>.
- [72] *Lab Buddy: The Most Versatile O/E Converter*. dirección: https://www.discoverysemi.com/Product_Pages/LabBuddy.php.
- [73] D. Wang, X. Liu, S. Fang et al., "Pt/AlGaN Nanoarchitecture: Toward High Responsivity, Self-Powered Ultraviolet-Sensitive Photodetection," en, *Nano Letters*, dic. de 2020, Publisher: American Chemical Society (ACS), ISSN: 1530-6984. dirección: <http://hdl.handle.net/10754/666512>.
- [74] Keysight, *DSAV164A Infiniium V-Series Oscilloscope: 16 GHz, 4 Analog Channels*. dirección: <https://www.keysight.com/us/en/product/DSAV164A/infiniium-v-series-oscilloscope-16-ghz-4-analog-channels.html>.
- [75] KeySight, "Infiniium V-Series Oscilloscopes User's Guide," dirección: <https://www.keysight.com/us/en/assets/3122-1478/configuration-guides/Infiniium-V-Series-Oscilloscopes.pdf>.
- [76] MathWorks, (*Not recommended*) *Convert Decimal to Base-P - MATLAB de2bi - MathWorks América Latina*. dirección: <https://la.mathworks.com/help/comm/ref/de2bi.html>.

- [77] R. Schmogrow, B. Nebendahl, M. Winter et al., "Error Vector Magnitude as a Performance Measure for Advanced Modulation Formats," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 24, n.º 1, págs. 61-63, ene. de 2012, Conference Name: IEEE Photonics Technology Letters, ISSN: 1941-0174. DOI: 10.1109/LPT.2011.2172405. dirección: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6046222> (visitado 08-02-2024).
- [78] MathWorks, *Scatter Plots and Constellation Diagrams - MATLAB & Simulink - MathWorks América Latina*. dirección: <https://la.mathworks.com/help/comm/ug/scatter-plots-and-constellation-diagrams.html>.
- [79] A. Kumar, N. Gour, S. K. Yadav, N. Gaur y H. Sharma, "A comparative PAPR, BER, and PSD for optical NOMA communication framework," *Optical and Quantum Electronics*, vol. 55, n.º 10, pág. 890, ago. de 2023, ISSN: 1572-817X. DOI: 10.1007/s11082-023-05148-2. dirección: <https://doi.org/10.1007/s11082-023-05148-2>.
- [80] 3GPP, *Release 16*. dirección: <https://www.3gpp.org/specifications-technologies/releases/release-16>.

5 ANEXOS

Los códigos y funciones utilizados para la ejecución de este trabajo de integración curricular están cargados en el siguiente repositorio de GitHub:

<https://github.com/ErickCifuentes01/TIC-2024.git>