



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

**SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES**

TEMA:

**Evaluación de las técnicas de modulación PSK y QAM en
sistemas OFDM basados en redes móviles 5G.**

AUTOR:

Ing. Peñafiel Tigrero, Washington Javier

**Trabajo de Titulación previo a la obtención del Grado
Académico de MAGÍSTER EN TELECOMUNICACIONES**

TUTOR:

Ing. Peñafiel Olivo, Kety Jenny Mgs

**Guayaquil, Ecuador
13 de marzo de 2025**



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por el Magíster **Peñafiel Tigreiro, Washington Javier** como requerimiento parcial para la obtención del Grado Académico de **MAGÍSTER EN TELECOMUNICACIONES**.

TUTOR

Ing. Peñafiel Olivo, Kety Jenny Mgs

DIRECTOR DEL PROGRAMA

Ing. Bohórquez Escobar, Celso Bayardo PhD

Guayaquil, a los 13 días del mes de marzo del año 2025



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

**SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES**

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Peñañiel Tigrero, Washington Javier**

DECLARÓ QUE:

El trabajo de titulación **Evaluación de las técnicas de modulación PSK y QAM en sistemas OFDM basados en redes móviles 5G**, previa a la obtención del grado Académico de **Magíster en Telecomunicaciones**, ha sido desarrollado, respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del trabajo de titulación del Grado Académico en mención.

Guayaquil, a los 13 días del mes de marzo del año 2025

EL AUTOR

Peñañiel Tigrero, Washington Javier



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

**SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES**

AUTORIZACIÓN

Yo, **Peñafiel Tigreiro, Washington Javier**

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la publicación, en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación de Maestría titulada: **Evaluación de las técnicas de modulación PSK y QAM en sistemas OFDM basados en redes móviles 5G**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 13 días del mes de marzo del año 2025

EL AUTOR

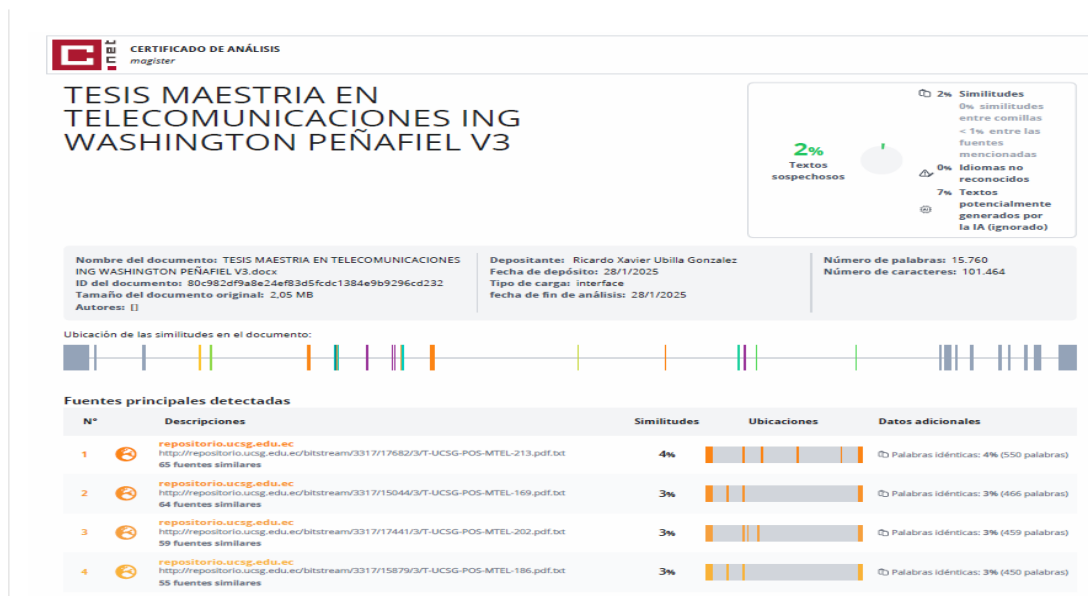
Peñafiel Tigreiro, Washington Javier



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

**SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES**

REPORTE COMPILATIO



Reporte Compilatio del trabajo de titulación de la Maestría en Telecomunicaciones denominado: **Evaluación de las técnicas de modulación PSK y QAM en sistemas OFDM basados en redes móviles 5G**, del estudiante Ing. Washington Javier Peñafiel Tigero se encuentra al 2% de coincidencias.

ING. KETY PEÑAFIEL OLIVO, MGS.
DOCENTE-TUTOR

Agradecimientos

Agradezco a mis padres, por el gran amor y su gran apoyo en la realización de esta tesis. Su fe en mí, incluso en los momentos más difíciles, ha sido el pilar de esta nueva meta en mi vida profesional. Le doy gracias a mis hermanos, quienes me brindaron su tiempo para escucharme y apoyarme, y a mi esposa e hija, quienes supieron estar cuando más los necesitaba. Sin ustedes, todo esto no habría sido posible. Su amor y sus ánimos han sido la fuerza que guio mi camino para concluir esta Tesis que forma parte de mi vida profesional.

Peñafiel Tigrero, Washington Javier

Dedicatoria

Este proyecto de tesis para la obtención del grado Académico de **Magíster en Telecomunicaciones** que fue realizado con todo el esfuerzo y profesionalismo se la dedico primeramente a mi querida esposa, a mi querida hija y a toda mi familia que palparon la pasión y me brindaron todo el apoyo necesario para cumplir una nueva meta de mi vida educativa en el mundo de las Telecomunicaciones.

Peñafiel Tigrero, Washington Javier



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

**SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES**


TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

f.  _____

Ing. Peñafiel Olivo, Kety Jenny Mgs
TUTOR

f.  _____

Ing. Zamora Cedeño, Nestor Armando MSc.
REVISOR

f.  _____

Ing. Bohórquez Heras, Daniel Bayardo MSc.
REVISOR

f.  _____

Ing. Bohórquez Escobar, Celso Bayardo, PhD
DIRECTOR DEL PROGRAMA

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE TABLAS	XI
ÍNDICE DE FIGURAS	XII
Resumen	XIV
Abstract	XV
Capítulo 1: Descripción del proyecto de intervención	1
1.1. Introducción	1
1.2. Antecedentes	1
1.3. Definición del problema	4
1.4. Justificación del problema	5
1.5. Objetivos	5
1.5.1. Objetivo general	5
1.5.2. Objetivos específicos	6
Capítulo 2: Modulaciones OFDM y UFMC	7
2.1. Evolución de las redes móviles	7
2.1.1. La primera generación – 1G	7
2.1.2. La segunda generación – 2G	7
2.1.2.1. Arquitectura GSM	8
2.1.2.2. Técnicas de acceso múltiple	12
2.1.2.3. La banda de frecuencia de la red GSM	13
2.1.3. La tercera generación – 3G	14
2.1.3.1. Arquitectura de la red UMTS	15
2.1.3.2. Técnicas de acceso utilizadas en 3G	19
2.1.3.3. Asignación de frecuencias y velocidad de una red 3G	20
2.1.4. La cuarta generación – 4G	20
2.1.4.1. La arquitectura 4G-LTE	21
2.1.4.2. Técnicas de acceso en redes 4G-LTE	23
2.1.4.3. Velocidades y movilidad de la red 4G	23
2.1.5. Calidad de servicio en las redes móviles	24
2.2. Introducción de la modulación en redes móviles celular	25
2.2.1. Principio de modulación	25
2.2.2. Ventajas de la modulación	27
2.2.3. Modulación de portadora única	27
2.2.4. Modulación multiportadora	28

2.3.	Modulación OFDM	29
2.3.1.	Canal de transmisión OFDM.	29
2.3.2.	Modulación de cada subportadora de la señal OFDM:	30
2.3.3.	Ortogonalidad:	31
2.3.4.	Conversión serie a paralelo:	32
2.3.5.	Intervalo de guarda	33
2.3.6.	Implementación digital de la modulación en el transmisor	34
2.3.7.	Implementación digital de la demodulación en el receptor.	35
2.3.8.	Ventajas y desventajas de OFDM	36
2.4.1.	5G para el internet de las cosas	38
2.4.2.	Emisor y receptor UFMC	38
2.5.	Revisión del estado del arte de las técnicas de modulación en redes móviles	42
CAPÍTULO 3: Diseño y Análisis de Resultados		44
3.1.	Introducción	44
3.2.	Simulación del sistema OFDM en la red móvil 5G usando Simulink	45
3.3.	Análisis de resultados de la relación pico/potencia media (PAPR)	47
3.3.1.	Análisis de Influencia del tipo de modulación en la PAPR	51
3.3.2.	Análisis de influencia del número de puntos de FFT en la PAPR... ..	52
3.3.3.	Influencia de los parámetros de diseño del filtro Dolph-Chebyshev en la PAPR	52
3.4.	Análisis de la tasa de error de bits (BER)	54
3.4.1.	Influencia del tipo de modulación QAM en la BER	55
3.4.2.	Influencia del tipo de modulación PSK en la BER	58
Conclusiones		60
Recomendaciones		62
Bibliografía		63
Anexos		72

ÍNDICE DE TABLAS

Capítulo 1:

Tabla 1. 1: Resumen de parámetros básicos en la norma LTE.	4
---	---

Capítulo 2:

Tabla 2. 1: Revisión de literatura de aplicaciones de modulaciones en telefonía móvil 4G y 5G	42
---	----

Capítulo 3:

Tabla 3. 1: Datos recopilados de la simulación de la PAPR usando los esquemas de modulación QAM.....	51
Tabla 3. 2: Datos recopilados de la simulación del tamaño de la FTT en la PAPR.....	52
Tabla 3. 3: Datos recopilados de la simulación de la BER usando diferentes esquemas de modulación QAM para OFDM	56
Tabla 3. 4: Datos recopilados de la simulación de la BER usando diferentes esquemas de modulación QAM para UFCM	57

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo 2:

Figura 2. 1: Arquitectura general de la tecnología GSM.	9
Figura 2. 2: Técnicas de acceso múltiple FDMA (izquierda) y TDMA (derecha).	13
Figura 2. 3: Se muestra la arquitectura general de UMTS.	15
Figura 2. 4: Técnica de acceso múltiple CDMA.	20
Figura 2. 5: Arquitectura general 4G.	22
Figura 2. 6: Esquemas de modulación con portadora (a) doble, (b) y filtrado, y (c) con switch y filtrado	26
Figura 2. 7: Esquema básico de un modulador OFDM.	29
Figura 2. 8: Canal de transmisión OFDM.	30
Figura 2. 9: Interpretación tiempo-frecuencia de una señal OFDM.	30
Figura 2. 10: Espectro a la salida del modulador OFDM.	31
Figura 2. 11: Intervalo de guarda.	33
Figura 2. 12: Los distintos intervalos de guarda	34
Figura 2. 13: Modulación OFDM digital.	35
Figura 2. 14: Demodulación OFDM digital	36
Figura 2. 15: Diagrama de bloques del transmisor UFMC	39
Figura 2. 16: Características del filtro	40
Figura 2. 17: Esquema funcional del receptor UFMC.	41

Capítulo 3:

Figura 3. 1: Diagrama esquemático de transmisión/recepción en redes 5G. 45	
Figura 3. 2: Pseudocódigo para evaluar el rendimiento de PAPR para diferentes formatos de modulación usando la tecnología OFDM.	47
Figura 3. 3: Rendimiento de PAPR para la modulación 4QAM usando OFDM.	49

Figura 3. 4: Rendimiento de PAPR para la modulación 4QAM usando OFDM.	49
Figura 3. 5: Rendimiento de PAPR para la modulación 16QAM usando OFDM.	50
Figura 3. 6: Rendimiento de PAPR para la modulación 64QAM usando OFDM.	50
Figura 3. 7: Rendimiento de PAPR para la modulación 256QAM usando OFDM.	51
Figura 3. 8: Variación PAPR para modulación UFMC usando FFT 512.	53
Figura 3. 9: Variación PAPR para modulación UFMC usando FFT 1024.	54
Figura 3. 10: Variaciones de la BER para diferentes esquemas de QAM en OFDM.	55
Figura 3. 11: Variaciones de la BER para diferentes esquemas de QAM en OFDM.	57
Figura 3. 12: Variaciones de la BER para diferentes esquemas de PSK en OFDM.	58
Figura 3. 13: Variaciones de la BER para diferentes esquemas de PSK en UFMC.	59

Resumen

La evolución de las redes móviles ha impulsado el desarrollo de nuevas técnicas de modulación para mejorar la eficiencia espectral y la calidad de la transmisión. En este contexto, los esquemas de modulación PSK (Phase Shift Keying) y QAM (Quadrature Amplitude Modulation) han sido ampliamente adoptados en los sistemas OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) utilizados en redes móviles 5G. Esta investigación evalúa el rendimiento de PSK y QAM en un sistema OFDM bajo condiciones de canales de desvanecimiento Rician y Rayleigh, utilizando simulaciones en MATLAB. Se analizan métricas clave como la Relación Pico-Potencia Media (PAPR) y la Tasa de Error de Bits (BER) para determinar la técnica de modulación más eficiente en términos de robustez y eficiencia espectral. Los resultados indican que QAM proporciona una mayor eficiencia espectral en condiciones de alta relación señal-ruido (SNR), mientras que PSK ofrece mayor robustez en entornos con desvanecimiento severo. Este estudio aporta información relevante para la optimización de sistemas de comunicación en redes 5G, permitiendo mejorar la calidad del servicio y la asignación eficiente de los recursos espectrales.

Palabras claves: 5G, OFDM, PSK, QAM, PAPR, BER.

Abstract

The evolution of mobile networks has driven the development of new modulation techniques to enhance spectral efficiency and transmission quality. In this context, Phase Shift Keying (PSK) and Quadrature Amplitude Modulation (QAM) have been widely adopted in Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) systems used in 5G networks. This research evaluates the performance of PSK and QAM in an OFDM system under Rician and Rayleigh fading channels, using MATLAB simulations. Key performance metrics such as Peak-to-Average Power Ratio (PAPR) and Bit Error Rate (BER) are analyzed to determine the most efficient modulation scheme in terms of robustness and spectral efficiency. The results indicate that QAM provides higher spectral efficiency in high Signal-to-Noise Ratio (SNR) conditions, while PSK offers greater robustness in severe fading environments. This study provides valuable insights for optimizing communication systems in 5G networks, enabling improved service quality and efficient spectral resource allocation.

Keywords: 5G, OFDM, PSK, QAM, PAPR, BER.

Capítulo 1: Descripción del proyecto de intervención

1.1. Introducción

La evolución y el progreso tecnológicos alcanzaron su punto más elevado tras la creación de Internet y su extensión a todos los rincones del mundo. Juega un papel eficaz en la distribución y el intercambio rápido y libre de información, pero existe una brecha en la forma en que nos comunicamos a gran escala. La telefonía móvil está en continuo crecimiento. No sólo se utilizan para comunicaciones de voz (GSM), sino que, además, gracias a los avances tecnológicos, para la parte de visión como en (3G, 4G), para compartir aplicaciones e incluso como módems inalámbricos o navegadores web.

A comienzos de la década de 2000, diversos operadores móviles, empresas fabricantes de equipos de telecomunicaciones y organizaciones se agruparon para desarrollar la llamada red móvil de nueva generación, con base en 3G y denominada LTE (Long Term Evolution). El principal atractivo de este nuevo estándar es que permite velocidades de hasta 1 Gigabit en fijo (estable) y 100 Mbps para usuarios móviles.

1.2. Antecedentes

A continuación, considero que merece la pena recordar la trayectoria de las tecnologías utilizadas hoy en día: por una parte, nos permite saber de dónde partimos para posicionarnos mejor hoy y, por otra, ver la evolución de la red troncal del operador.

- Años 80: La primera generación de teléfonos móviles surgió a principios de los años 80 con un mediocre servicio de comunicaciones móviles, mediocre pero muy caro. 1G tenía muchos defectos: incompatibilidad de estándares de una región a otra, transmisión analógica insegura (era posible escuchar las llamadas), inexistencia de roaming internacional (el roaming es la posibilidad de mantener tu número en una red distinta a la de tu operador).

- Años 90: aparece GSM, se trataba del estándar 2G, basado en transmisiones digitales que permiten una transmisión de datos segura (con encriptación). El estándar GSM permitió también el envío de mensajes SMS (limitados a 80 caracteres). Cabe recordar que el principio de GSM era efectuar llamadas telefónicas. Así que GSM se basa en una conexión orientada a circuitos, ya utilizada por la telefonía fija. La ventaja de esta conexión es que abre un enlace entre el llamante y el llamado, que sólo se cierra al final de la llamada. Una troncal es como una línea de ferrocarril: supóngase que dos estaciones están unidas por varias líneas. Si el sistema de cambio de vías no cambia, todos los trenes seguirán la misma ruta. En el caso de la telefonía, el sistema de conmutación se establece durante el tono de conexión y luego se mantiene durante toda la llamada. La desventaja es que se utiliza un enlace, aunque no se esté hablando (y aunque se esté hablando, cuando nos comunicamos, hay más de un 60% de vacíos en nuestra conversación), es decir, el enlace está reservado para usted, aunque no esté transmitiendo nada. La ventaja y el motivo de esta elección es que la conversación llega en el orden correcto, (Si cuenta del 1 al 10, el 1 llegará primero a su corresponsal y el 10 el último, porque todos estos números habrán seguido el mismo enlace). El GSM fue un gran éxito, creando la posibilidad de hacer llamadas en cualquier lugar, con la opción de enviar mini-mensajes. Ante su éxito, hubo que ofrecer nuevas frecuencias a los operadores para transportar todas las comunicaciones, y también aparecieron nuevos servicios, como los MMS. La velocidad de datos de 9,6 kbps que ofrecía GSM era insuficiente, por lo que nuevas técnicas de modulación y codificación permitieron aumentar la velocidad de datos y aparecieron las primeras conexiones IP (GPRS, EDGE). También han surgido aplicaciones M2M (Machine To Machine), como el pedido de productos para suministrar a una máquina expendedora.

- Años 2000: 3G fue impulsada por los requisitos de las IMT-2000 para permitir las aplicaciones de vídeo en los teléfonos móviles. Una aplicación de vídeo requiere una velocidad de datos mínima de 384 kbps. Las aplicaciones en cuestión eran la posibilidad de ver YouTube, la videotelefonía, etc. Además del aumento del ancho de banda, una cuestión compleja de resolver era el paso de un servicio de telefonía (conexión por circuito) a un servicio de DATOS (conexión por paquetes). 3G tuvo un comienzo lento tras un retraso de 2 años en las previsiones (la insuficiente autonomía móvil se debe, entre otras cosas, al dimensionamiento de los amplificadores para transmitir la señal sin distorsionarla demasiado. El amplificador se sitúa antes de la antena y amplifica la señal para que pueda ser recibida por ésta. Es un poco como escuchar música en el patio desde la radio en su cuarto).

La tecnología 3G empezó a aparecer en el mercado a partir de la versión 3.5 (2005.c), que se denominó HSDPA y aumentaba las velocidades de bajada. Le siguieron HSUPA para aumentar las velocidades de subida y, por último, HSPA y HSPA+. El acceso a los servicios de conexión a Internet, y sobre todo de mensajería, se ha ido incorporando progresivamente a los hábitos de los usuarios. Los terminales han mejorado (smartphones, etc.), permitiendo un uso más cómodo de las conexiones de banda ancha. Tras 3G (la experiencia de 20 años de telefonía) y las evoluciones de esta norma (HSDPA, HSUPA, HSPA, HSPA+), LTE aparece sobre todo como un avance técnico:

- Nueva interfaz de radio basada en la multiplexación de acceso múltiple por división de frecuencia ortogonal (Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA)
- Modificación de la arquitectura de red existente para ofrecer una conexión totalmente IP.

En 2010 la norma LTE-Advanced impone criterios básicos de rendimiento y latencia, que se resumen en el cuadro siguiente:

Tabla 1. 1: Resumen de parámetros básicos en la norma LTE.

Tecnología	LTE	IMT-Avanzado	LTE-Avanzado
Velocidad máxima teórica			
DL (descarga)	300 Mbps	1 Gbps	1 Gbps
UL (subida)	75 Mbps	500 Mbps	500 Mbps
Bandas de frecuencias	1.4 a 20 MHz	40 MHz	100 MHz
Latencia			
Datos	10 ms	10 ms	10 ms (RTT)
Sesión	100 ms	100 ms	50 ms
Eficiencia espectral			
Máxima (DL/UL)	5.0/2.5 bps/Hz	15/6.75 bps/Hz	30/15 bps/Hz
Media (DL/UL)	1.8/0.8 bps/Hz	2.2/1.4 bps/Hz	2.6/2.0 bps/Hz
En el límite (DL/UL)	0.04/0.02 bps/Hz	0.06/0.03 bps/Hz	0.009/0.07 bps/Hz

Fuente: (Gkonis et al., 2020; Imam-Fulani et al., 2023; Ponnimbaduge Perera et al., 2018)

1.3. Definición del problema.

El desarrollo de redes móviles 5G ha impulsado la necesidad de mejorar la eficiencia espectral y la robustez de las técnicas de modulación utilizadas en los sistemas de comunicación. En este contexto, la multiplexación por división de frecuencias ortogonales (OFDM) se ha consolidado como la tecnología base para la transmisión de datos en estas redes. Sin embargo, su desempeño puede verse afectado por condiciones adversas del canal, como el desvanecimiento Rician y Rayleigh, lo que impacta la calidad del servicio (QoS).

Las modulaciones PSK (Phase Shift Keying) y QAM (Quadrature Amplitude Modulation) han sido ampliamente implementadas en sistemas OFDM, pero su rendimiento varía según el tipo de canal de propagación. La

selección adecuada de la modulación es crucial para optimizar la tasa de error de bits (BER) y la relación pico a potencia media (PAPR), garantizando una transmisión eficiente.

Por lo tanto, esta investigación busca evaluar el desempeño de PSK y QAM en entornos de desvanecimiento Rician y Rayleigh, utilizando simulaciones en MATLAB. Se analizarán métricas clave para determinar qué técnica de modulación ofrece mejor rendimiento en términos de robustez y eficiencia espectral en redes móviles 5G, contribuyendo al diseño de sistemas de comunicación más eficientes y adaptativos.

1.4. Justificación del problema.

La investigación comienza con una revisión detallada de los fundamentos teóricos de los sistemas OFDM y de los modelos de fading Rician y Rayleigh. Luego, se desarrolla un modelo de simulación en Matlab que permita implementar las técnicas de modulación PSK y QAM en un sistema OFDM, sometido a las condiciones de estos canales. A través de simulaciones, se evalúa el rendimiento en términos de la tasa de error de bits (BER), la relación señal-ruido (SNR), y la eficiencia espectral, con el objetivo de identificar la técnica de modulación más adecuada para diferentes escenarios de comunicación en redes 5G.

1.5. Objetivos.

1.5.1. Objetivo general.

Evaluar el rendimiento de las técnicas de modulación PSK y QAM en sistemas OFDM utilizados en redes móviles 5G, considerando su desempeño en canales de desvanecimiento Rician y Rayleigh, con el fin de determinar su impacto en la eficiencia de la transmisión y la robustez ante variaciones del canal.

1.5.2. Objetivos específicos.

- ✓ Describir los fundamentos teóricos de los esquemas de modulación digital que se utilizan en redes de telecomunicaciones.
- ✓ Realizar la implementación de las técnicas de modulación PSK y QAM en sistemas OFDM sobre redes móviles 5G.
- ✓ Evaluar las técnicas de modulación PSK y QAM , con su comparativas de los sistemas OFDM basados en redes móviles 5G

Capítulo 2: Modulaciones OFDM y UFMC

2.1. Evolución de las redes móviles

Actualmente existen cuatro generaciones de redes móviles, clasificadas como 1G, 2G, 3G y 4G; y una nueva generación denominada 5G. En las secciones 2.1.1. a 2.1.1.4 se describen las generaciones de telefonía móvil celular.

2.1.1. La primera generación – 1G.

La primera generación de telefonía móvil (conocida como 1G) se introdujo en los años ochenta. Se basa en la transmisión analógica con modulación de frecuencia. Estaba formada por dispositivos relativamente grandes que utilizaban un ancho de banda reducido. Este estándar sólo permite la transmisión de voz. La zona de cobertura se divide en células de diferentes tamaños. Se utilizan principalmente los siguientes estándares.

- AMPS (Advanced Mobile Phone System) apareció en EE. UU. y fue el primer estándar para redes 1G. Tenía mecanismos de seguridad débiles (Chataut & Akl, 2020; Saha, 2017), por lo que era posible el pirateo de líneas telefónicas.
- TACS (Total Access Communication System) es la versión europea de la norma AMPS, que utiliza una banda de frecuencias de 900 MHz (Koi-Akrofi et al., 2022; Lin, 2021).

2.1.2. La segunda generación – 2G.

El Sistema Global de Comunicaciones Móviles (Global System for Mobile Communication, GSM) es el primer estándar de telefonía celular totalmente digital. Es la referencia mundial para los sistemas de radiocomunicación móvil (Fraga-Lamas, 2017; Munir et al., 2007). La red GSM ofrece a sus abonados servicios que permiten la comunicación de extremo a extremo entre estaciones móviles a través de la red. Esta red permite la comunicación entre dos estaciones móviles o entre una estación móvil y una estación fija.

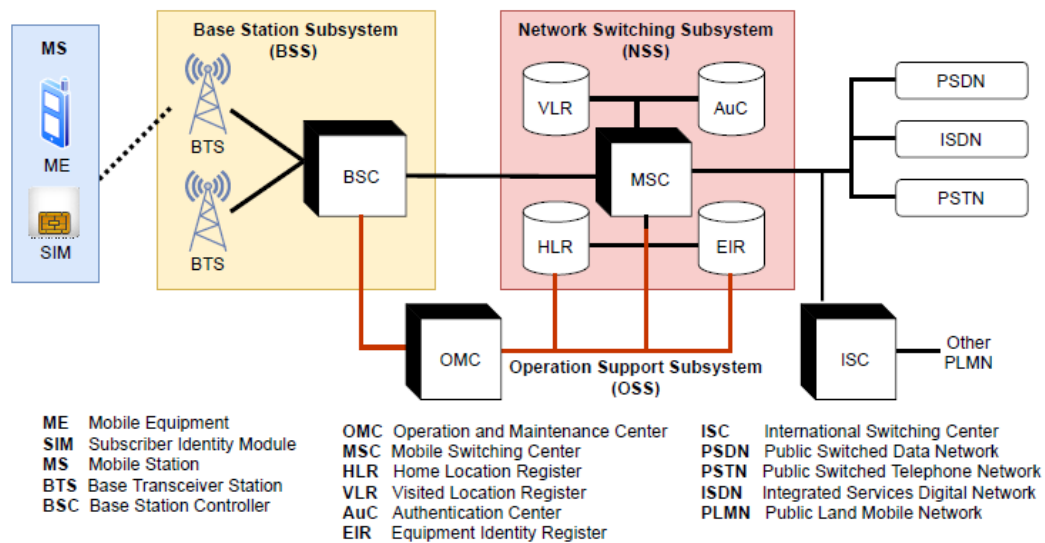
Otros servicios incluyen la transmisión de datos y la transmisión de mensajes alfanuméricos cortos. Transporta información de extremo a extremo en modo circuito en la red GSM sin modificaciones, lo que garantiza la cronología de la información intercambiada. En la red GSM, los datos de usuario y la señalización de red se transportan en canales de comunicación diferentes. (Zhong et al., 2018)

2.1.2.1. Arquitectura GSM.

La red GSM es un sistema que se divide en varias estaciones transceptoras de base (Base Transceiver Station, BTS), es decir, que cada BTS incluye una (o varias) celdas. Una comunicación en curso puede pasar de una celda a otra sin interrupción, lo que permite movilidad a los usuarios (Liyanage et al., 2018). La figura 2.1 muestra la arquitectura general del GSM. El sistema GSM está compuesto por 3 subsistemas:

- El subsistema de estación base (Base Station Subsystem, BSS) o de radio, que contiene la estación base y su controlador. (Liyanage et al., 2018; Zhong et al., 2018)
- El subsistema de conmutación de red o de encaminamiento (Network Switching Subsystem, NSS). (Liyanage et al., 2018; Zhong et al., 2018)
- El subsistema de soporte de operaciones (Operations Support Subsystem, OSS). (Liyanage et al., 2018; Zhong et al., 2018)

Figura 2. 1: Arquitectura general de la tecnología GSM.



Fuente: (Allelco, 2024; H. Y. Chen, 2021)

1. La estación móvil (Mobile Station, MS): está formada por el propio teléfono móvil y una tarjeta llamada módulo de identidad de usuario (Subscriber Identity Module, SIM), elemento esencial para acceder a la red. Esta tarjeta contiene la información personal del usuario en un microprocesador. Al insertar la tarjeta SIM en cualquier teléfono móvil, el usuario puede recibir y hacer llamadas y acceder a todos los servicios a los que se haya suscrito, es decir, que el teléfono móvil y el usuario son completamente independientes. (Manos, 2019; Xenakis et al., 2016)

Los teléfonos móviles se identifican por su número “Identidad internacional de equipos móviles” (International Mobile Equipment Identity, IMEI), que proporciona información sobre el tipo de dispositivo, fabricante y su número de serie. La tarjeta SIM contiene el número “Identidad Internacional de Suscriptor Móvil, IMSI), así como una clave secreta de seguridad y otra información. Los números IMEI e IMSI son independientes, lo que separa el teléfono móvil del usuario. Además, la tarjeta SIM protege al abonado de conexiones fraudulentas introduciendo un número de identidad personal (código PIN) al acceder a la red. (Arapinis et al., 2017; Sorseth, 2017)

2. El subsistema BSS: sólo comprende dos tipos de equipos, que son:

- BTS: es un dispositivo de radiotransmisión de la red GSM que realiza diversas operaciones, como la codificación/decodificación de la información transmitida por la interfaz de radio y también del proceso de modulación/demodulación. (T. Islam, 2016; Pathan, 2016)
- BSC: es un dispositivo que puede controlar una o varias BTS. Las principales funciones del BSC son las siguientes (Melero et al., 2003; Rana, 2020):
 - Enrutar la llamada entre la BTS y el MSC.
 - Asignación de los recursos utilizados en la interfaz de radio. Esta función incluye la asignación inicial y el control de los recursos radioeléctricos durante el procedimiento de traspaso.
 - Control de la BTS (puesta en marcha, supervisión, activación de los recursos radio utilizados por la llamada).

3. El subsistema de conmutación de red (NSS): aquí se describen brevemente los papeles y funciones de los componentes de la red central GSM, que son:

- Centro de conmutación móvil (Mobile Switching Centre, MSC): es un conmutador de datos y señalización. Se encarga de gestionar el proceso de establecimiento de la comunicación con el móvil. (Irving & Ochang, 2016; Melero et al., 2003)
- MSC de puerta de enlace (Gateway MSC, GMSC): es un MSC bastante especial utilizado como pasarela entre la red GSM y otras redes móviles (otros operadores) o redes de línea fija (Redes Telefónicas Públicas Conmutadas, Redes Digitales de Servicios Integrados, etc.) (Ratul & Wang, 2023). Cuando se contacta con un usuario GSM desde fuera de la red GSM (lo que se conoce como llamada entrante), la llamada pasa por el GSMC, que interroga al HLR antes de enrutar la llamada al MSC del que depende el usuario (Zhong et al., 2018).
- Registro de ubicación de visitantes (Visitor Location Register; VLR) es una base de datos que anexa a uno o varios MSC. VLR se utiliza

para registrar a los usuarios que se encuentran en una zona geográfica determinada, denominada área de localización (Location Area, LA). Cuando el móvil se desplaza en modo espera y detecta un cambio en LA, debe informar de este cambio al VLR. Esta actualización es necesaria para que la red pueda contactar con el móvil en caso de llamada entrante. (Bakare & Ekolama, 2021; Mallikharjuna Rao et al., 2023)

Por ejemplo, VLR contiene datos bastante similares a los del HLR. El VLR también almacena la siguiente información para cada usuario:

- Identidad temporal del móvil (Temporary Mobile Station Identity, TMSI), el VLR asigna un número temporal único a cada móvil situado en su área de cobertura; este número se denomina TMSI, y se utiliza para identificar el móvil durante las interacciones entre estaciones móviles, y sólo es conocido por parte de la MS. (Jiang & Han, 2024; Kheddar, 2022)

En la mayoría de las redes, el MSC y VLR son un mismo equipo: (Kotte, 2016; Manos, 2019)

- Registro de Ubicación Principal (Home Location Register, HLR) es la base de datos que contiene información sobre los abonados gestionados por el operador. Para cada abonado, el HLR almacena la siguiente información:
 - Información sobre la suscripción: suscripción o no a datos, suscripción a un servicio adicional concreto, velocidad máxima autorizada, etc.
 - La identidad del teléfono móvil, o IMSI.
 - El número de llamada del abonado, o Número ISDN Internacional de Estación Móvil (Mobile Station International ISDN Number, MSISDN). Además, HLR almacena el número VLR con el que está registrado el abonado, para poder localizarlo fácilmente en caso de llamada.

- Centro de Autenticación (Authentication Center, AuC): es un elemento que permite a la red proporcionar ciertas funciones de seguridad de la red GSM: (H. Y. Chen, 2021; Ratul & Wang, 2023)
 - Autenticación de la IMSI del usuario
 - Encriptación de llamadas.

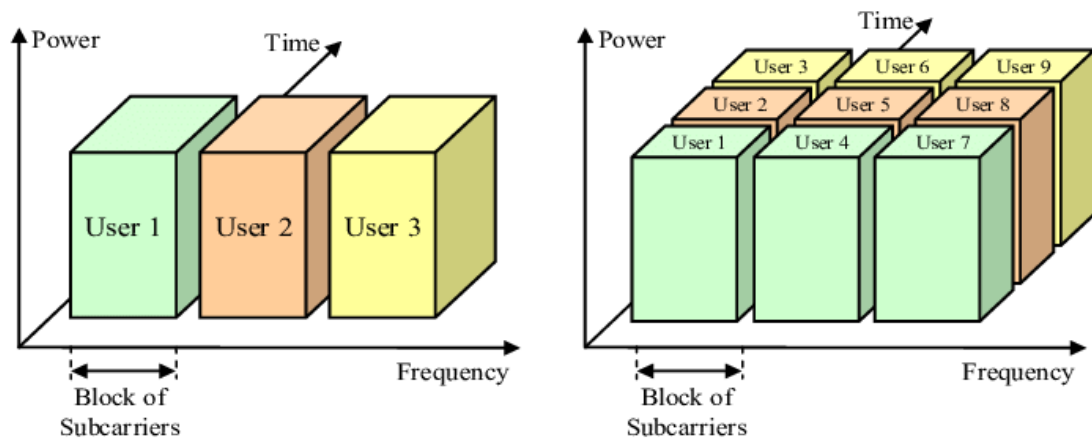
Estas dos funciones de seguridad se activan al inicio del establecimiento de llamada con el abonado. Si uno de los dos procedimientos falla, la llamada se rechaza. El AuC está acoplado al HLR y contiene una clave de identificación para cada usuario, lo que le permite realizar las funciones de autenticación y cifrado. (H. Y. Chen, 2021)

- Registro de identidad del Equipo (Equipment Identity Register, EIR): es una función opcional de las redes GSM destinada a luchar contra el robo de terminales móviles. El EIR es en realidad una base de datos que contiene una lista de móviles prohibidos, conocida como la lista negra. (Chernyshev et al., 2017)

2.1.2.2. Técnicas de acceso múltiple.

La mayoría de los sistemas 2G utilizan la técnica de Acceso Múltiple por División de Tiempo (Time Division Multiple Access, TDMA), que consiste en dividir cada canal de comunicación en tramas de 8 intervalos de tiempo. En la Figura 2.2 se muestran las dos técnicas: (1) acceso múltiple por división de frecuencia (Time Division Multiple Access, FDMA) y (2) TDMA. (Faruque, 2019b)

Figura 2. 2: Técnicas de acceso múltiple FDMA (izquierda) y TDMA (derecha).



Fuente: (Y. Chen et al., 2018; Nikolova et al., 2009)

Cada portadora se divide en 8 intervalos de tiempo denominados time-slots. La duración de una ranura se ha fijado para GSM en 7500 periodos de la señal de referencia suministrada por un cristal de cuarzo a 13 MHz, que es el ritmo de todos los móviles GSM: $T_{slot} = \frac{7500}{13 \text{ MHz}} = 577 \mu s$. En una misma portadora, las ranuras se agrupan en paquetes de 8, por lo que constituyen una trama TDMA. La duración de la trama es, por tanto: (Faruque, 2019a; Riahi & Riahi, 2021)

$$TTDMA = 8 \cdot T_{slot} = 4.615 \text{ ms}$$

Mientras que, la técnica FDMA es el método más antiguo y consiste en asignar un número determinado de frecuencias portadoras a cada estación base. El espectro disponible se divide en varios canales de radio con un ancho de banda fijo. Cada canal de frecuencia se asigna simultáneamente a un único usuario. (Kukushkin, 2018)

2.1.2.3. La banda de frecuencia de la red GSM

El sistema GSM/DCS utilizaba dos bandas de frecuencias, una a 900 MHz y otra a 1800 MHz. La norma GSM preveía que la telefonía móvil GSM ocupará dos bandas de frecuencias en torno a 900 MHz: (Jiang & Han, 2024)

- La banda de frecuencias 890 – 915 MHz para las comunicaciones de enlace ascendentes (del móvil a la estación base).
- La banda de frecuencia de 935 – 960 MHz para las comunicaciones de enlace descendente (de la estación base al móvil).

Cada portadora GSM se identifica unívocamente por un número n , designado Número Absoluto de Canal de Frecuencia de Radio (Absolute Radio Frequency Channel Number, ARFCN), codificado en 10 bits según el siguiente plan en el que la frecuencia de enlace descendente se expresa en MHz: (Pàmies, 2017; Salih et al., 2022)

- Para $1 \leq n \leq 124 \rightarrow f = 935 + (0.2 \times n)$ para GSM.
- Para $975 \leq n \leq 1024 \rightarrow f = 935 + [0.2 \times (n - 1024)]$ para GSM ampliado (EGSM)

En el Sistema Celular Digital 1800 (Digital Communication System 1800, DCS-1800) las características son casi idénticas al GSM en cuanto a protocolos y servicio. Las comunicaciones de enlace ascendente tienen lugar entre 1710 y 1785 MHz y las de enlace descendente entre 1805 y 1880 MHz. (Zhong et al., 2018)

2.1.3. La tercera generación – 3G.

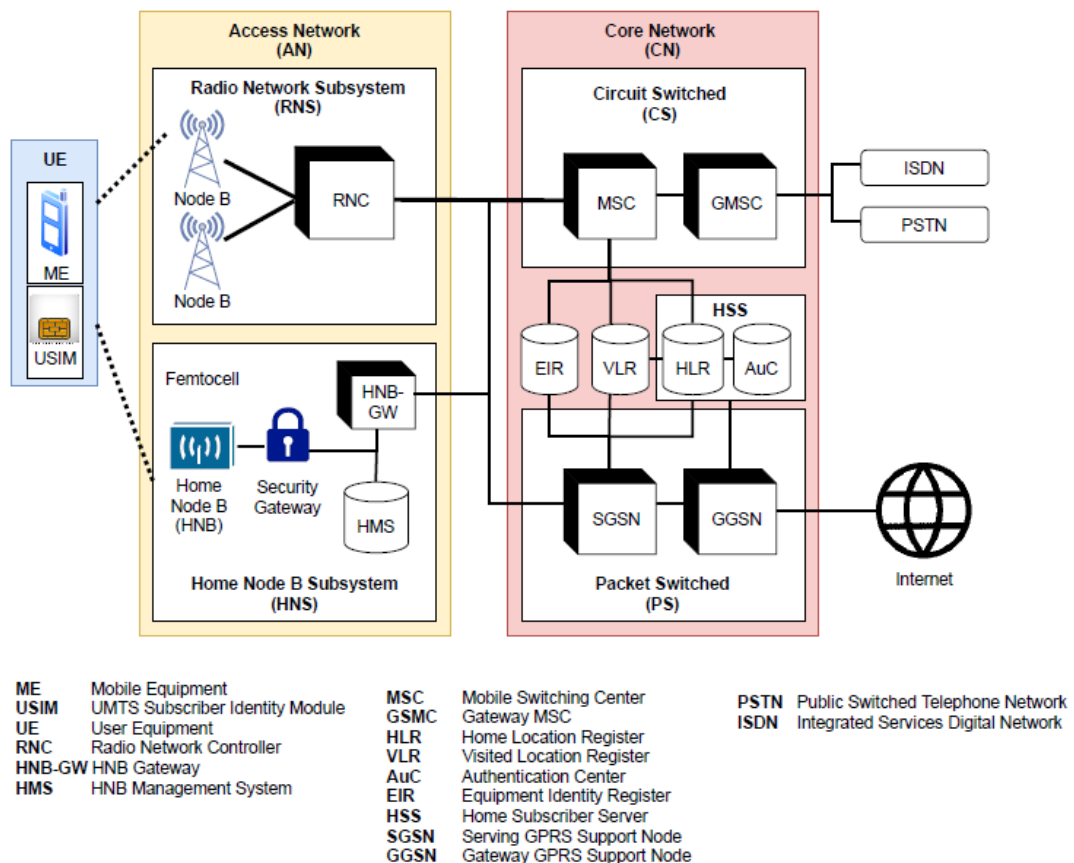
El estándar 3G fue definido y especificado por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT). El objetivo inicial era disponer de un único estándar universal que ofreciera servicios multimedia móviles de alta velocidad en una única banda de frecuencias (Jiang & Han, 2024; Tadayoni et al., 2018). El Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles (Universal Mobile Telecommunications System, UMTS) forma parte de las tecnologías de telefonía móvil de tercera generación (3G). Además, se basaba en la tecnología de Acceso Múltiple por División de Código de Banda Ancha (Wideband Code Division Multiple Access, W-CDMA), fue estandarizada por el Proyecto de Asociación de Tercera Generación (3rd Generation Partnership Project, 3GPP) y era la implementación europea dominante de la

especificación "Telecomunicaciones Móviles Internacionales 2000" (International Mobile Telecommunications-2000, IMT-2000) de la UIT para sistemas de radio celular 3G. UMTS también se denominaba a veces 3GSM, para subrayar el vínculo que se había establecido entre UMTS y GSM, de la que es sucesor. (Holma et al., 2024; Logvinov & Smolskiy, 2022)

2.1.3.1. Arquitectura de la red UMTS

La red UMTS se compone de los siguientes elementos: (1) la red de acceso radio terrestre UMTS (UMTS Terrestrial Radio Access Network, UTRAN), (2) los terminales móviles, (3) la red central (Core Network, CN) derivada de la red GSM, que proporciona conexiones internas y (4) la red inteligente (IN) cuyo papel es proporcionar funciones como localización, registro, gestión de recursos, movilidad, etc. La Figura 2.3 muestra la arquitectura general de la red UMTS.

Figura 2. 3: Se muestra la arquitectura general de UMTS.



Fuente: (Ahmadi, 2016; H. Y. Chen, 2021)

1. El terminal de usuario (UE): contiene los siguientes elementos:

- El equipo móvil (Mobile Equipment, ME): los móviles en UMTS dejaron de ser simples teléfonos y se convirtieron en terminales multimedia capaces de ofrecer simultáneamente servicios de datos, audio y vídeo en cualquier momento. (Jiang & Han, 2024; Taid, 2021)
- Módulo de identidad del abonado universal (Universal Subscriber Identity Module, USIM): se trataba de una tarjeta inteligente, cuya versión era mejorada de la SIM (en el caso de GSM), dedicada a la telefonía 3G. (Sevilla Castillo, 2016)

2. La red de acceso radioeléctrico (UTRAN): proporciona funciones de encaminamiento de la información del usuario a la red central. Actúa como pasarela entre el equipo de usuario y la red central a través de las interfaces Uu e Iu (Melero et al., 2003). La red de acceso UTRAN se compone de varios elementos: una o varias estaciones base (denominadas Node B), controladores de red radioeléctrica (Radio Network Controller, RNC) e interfaces de comunicación entre los distintos elementos de la red UMTS.

- Node B: es una estación base distribuida geográficamente por todo el país, y el propósito principal del Node B es proporcionar funciones de recepción y transmisión de radio para una o más células de la red de acceso UMTS con equipos de usuario. (Ghosh, 2017; Pasarelska & Pasarelski, 2022)
- RNC: es un controlador de Node B y es de nuevo el equivalente del BCS en la red GSM. La función principal del RNC es encaminar las comunicaciones entre el Node B y la red central UMTS. RNC es el punto de acceso de todos los servicios a la red central. (Jiang & Han, 2024)

En la red UMTS coexisten varios tipos de interfaz de comunicación: (Ghosh, 2017; Jiang & Han, 2024; Taid, 2021)

- Uu: Interfaz entre los equipos de usuario y la red de acceso UTRAN. Permite la comunicación con la UTRAN a través de la tecnología CDMA.

- lu: Interfaz entre la red de acceso UTRAN y la red central UMTS. Permite al controlador de radio RNC comunicarse con la SGSN
- lur: Interfaz que permite la comunicación entre dos radiocontroladores RNC.
- lub: Interfaz que permite la comunicación entre un Node B y un controlador de radio RNC.

3. La red central (CN): es la parte del sistema UMTS encargada de gestionar los servicios suscritos por el abonado. Permitía la comunicación dentro de una misma red de telefonía móvil e interconectaba esta última con las redes externas, ya sean fijas o móviles, digitales o analógicas. También controla la seguridad y gestiona la interfaz con las redes externas. La red central se compone de:

- Dominio de conmutación de circuitos (Circuit Switched, CS): fue usada para la telefonía, es decir, fue el responsable de la transmisión de voz, transmisión de mensajes cortos, fax y servicios de tipo tiempo real. El dominio CS se compone de los siguientes elementos:
 - MSC: es un conmutador que proporciona la interfaz con la red central para un móvil que accede a servicios de conmutación de circuitos.
 - GMSC: es una pasarela entre la red UMTS y la red telefónica pública conmutada (Public Switched Telephone Network, PSTN).
 - VLR: es una base de datos, similar al HLR, adjunta a uno o más MSC. El VLR almacena información sobre la posición y el movimiento del abonado dentro del área de localización vinculada a uno o más MSC.

- El dominio PS: permite la conmutación de paquetes, es decir, proporciona conexiones a redes que utilizan el protocolo IP (Intranet, WAP) y a redes X.25. El dominio PS se compone de los siguientes elementos:

- Nodo de Soporte GPRS de Servicio (Serving GPRS Support Node, SGSN): se encarga de los servicios de transmisión de datos entre los móviles y la red móvil. Sus tareas incluyen la gestión de la movilidad, la gestión de sesiones, el encaminamiento y la transferencia de paquetes.
 - Nodo de Soporte de Pasarela GPRS (Gateway GPRS Support Node, GGSN): es una pasarela a redes externas de conmutación de paquetes, como Internet. GGSN desencapsula los paquetes IP que llegan en un contexto PDP desde el SGSN y los envía a la red IP externa correspondiente (Internet, ATM, PSTN, etc.). además, GGSN puede enrutar paquetes IP desde redes IP externas al SGSN del destinatario a través de un túnel.
- Elementos comunes: son elementos compartidos por el dominio de conmutación de paquetes y el dominio de conmutación de circuitos:
 - HLR: es una base de datos que contiene toda la información relativa a los abonados: identidad del equipo del usuario, número de llamada del usuario, información relativa a las posibilidades del abono contratado por el usuario.
 - Registro de identidad del equipo (Equipment Identity Register, EIR): es una base de datos que contiene una lista de teléfonos móviles prohibidos enumerados por un número único específico de cada equipo de usuario, el número IMEI.
 - El AuC (Authentication Center): se encarga de la autenticación de los usuarios, así como del cifrado de las comunicaciones para garantizar un acceso seguro al sistema.
 - El dominio de circuitos gestionará los servicios en tiempo real dedicados a las conversaciones telefónicas (videotelefonía, videojuegos, streaming, aplicaciones multimedia). Estas aplicaciones requieren tiempos de transferencia rápidos.

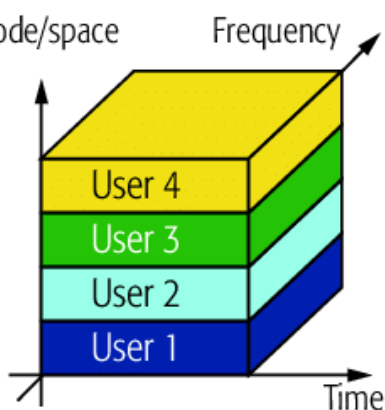
2.1.3.2. Técnicas de acceso utilizadas en 3G.

UMTS adoptó el sistema de acceso múltiple por división de código de banda ancha (Wideband Code Division Multiple Access, WCDMA), debido a que admitía información de usuario de hasta 2 Mbps, en lugar de las decenas de kbps de los sistemas anteriores (Y. Chen et al., 2018). El principio básico de CDMA es que todos los usuarios que se comunican en la misma célula tienen asignada la misma frecuencia al mismo tiempo, y la discriminación entre llamadas se consigue codificando a cada usuario con un código diferente (Sammons, 2012).

Esta codificación es el producto de la señal a transmitir y una secuencia pseudoaleatoria con una tasa mucho mayor (ocho veces en W-CDMA) que la señal. La señal binaria original por transmitir se codifica mediante la codificación de no retorno a cero (Non-Return-to-Zero, NRZ) y luego se multiplica por la secuencia de codificación pseudoaleatoria. El resultado es una señal con una frecuencia igual a la de la secuencia pseudoaleatoria. Esto se conoce como modulación de secuencia directa.

También se ha realizado una operación de espectro ensanchado, ya que para una señal de frecuencia máxima F , tras la modulación, la señal lista para la transmisión tiene una frecuencia máxima nF , donde n es la relación entre la velocidad de la secuencia de codificación y la de la señal que se va a transmitir. Esto se conoce como ganancia de procesamiento o factor de propagación. El receptor recibe una señal multiplexada que comprende todas las secuencias codificadas. Al multiplicar por una de las secuencias codificadas, recupera una única señal original, ya que las demás están demasiado mal descodificadas, por estar insuficientemente correlacionadas, para ser percibidas.

Figura 2. 4: Técnica de acceso múltiple CDMA.



Fuente: (Li, 2016)

2.1.3.3. Asignación de frecuencias y velocidad de una red 3G:

Las especificaciones IMT-2000 de la UIT definen las características de tercera generación de telefonía móvil. Estas características incluyen, entre otras, las siguientes:

- Una alta velocidad de transmisión:
 - 144 Kbps con cobertura total para uso móvil.
 - 384 Kbps con cobertura media para uso peatonal.
 - 2 Mbps con una zona de cobertura reducida para uso fijo.
- Compatibilidad global.
- Compatibilidad de los servicios móviles de tercera generación con las redes de segunda generación.

3G permite alcanzar velocidades superiores a 144 kbps, abriendo así la puerta a usos multimedia como la transmisión de video, la videoconferencia o el acceso a internet de alta velocidad. Las redes 3G utilizan bandas de frecuencias diferentes a las de las redes anteriores: 1885-2025 MHz y 2110-2200 MHz.

2.1.4. La cuarta generación – 4G.

4G es la cuarta generación de telefonía móvil, marcada por la llegada de la nueva tecnología de Evolución a Largo Plazo (Long Term Evolution, LTE), que se caracteriza por una velocidad teórica de 150 Mbps. Las principales

innovaciones de la 4G se encuentran en el aumento de las velocidades máximas teóricas (mejor velocidad real y mayor capacidad de las redes para gestionar el tráfico) y en la reducción de los tiempos de latencia (tiempo de reacción reducido que permite una mejor interactividad). De este modo, el usuario dispone de una conexión aproximadamente 3 veces más rápida que en 3G (resultado observado en los valores medianos de velocidad durante la encuesta de calidad de servicio realizada por la ARCEP en 2013/2014).

2.1.4.1. La arquitectura 4G-LTE

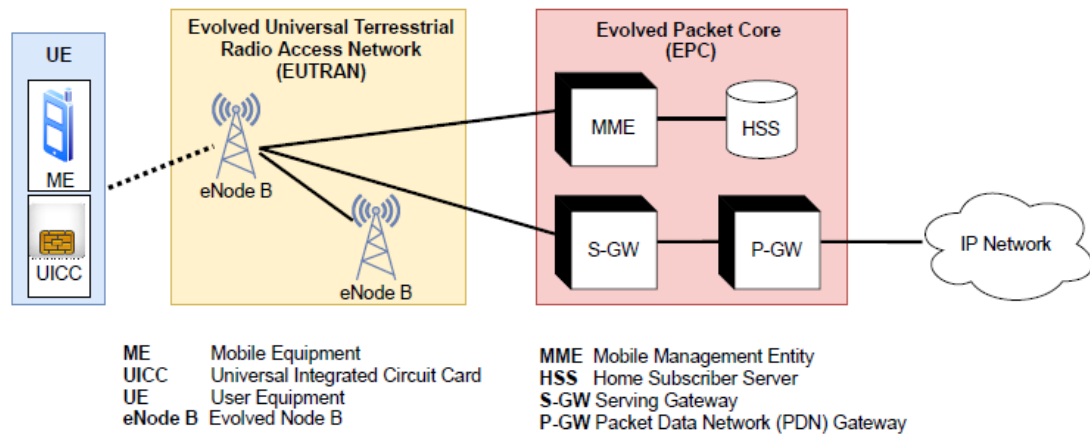
A diferencia de la transición de 2G a 3G, la tecnología 4G se basa en una red central completamente nueva: el núcleo de paquetes evolucionado. Esta nueva red central utiliza nuevos equipos, pero conserva parte del espíritu de la red central de paquetes de 2G y 3G. La principal novedad del Núcleo de Paquetes Evolucionado (Evolved Packet Core, EPC) es la separación de los planos de control y uso de los equipos centrales. Al igual que la red de próxima generación (Next Generation Network, NGN) para el circuito, los flujos de «control» y «uso» ya no estarán destinados, en la mayoría de los casos, al mismo equipo.

A continuación, se describen los nuevos elementos de la tecnología 4G:

- Nodo de Soporte GPRS de Servicio (Serving GPRS Support Node, SGSN) se separa en dos entidades funcionales diferentes: (1) Entidad de Gestión de Movilidad (Mobile Management Entity, MME) para el plan de «control» y (2) pasarela de servicio (Serving Gateway, SGW) para el plan de «uso». Además, MME gestionará las sesiones del terminal (autenticación, autorizaciones, sesiones de voz y datos) y la movilidad (localización, paging, hand-over, etc.).
- SGW se encargará del encaminamiento de los flujos «útiles» en la red central (comunicaciones de voz, tráfico de datos, etc.).
- Nodo de Soporte de Pasarela GPRS (Gateway GPRS Support Node, GGSN) se sustituye por una pasarela de red de datos por paquetes (Packet Data Network Gateway, PGW). El PDN Gateway es

responsable del enlace con otras redes (públicas o privadas), y en particular con Internet.

Figura 2. 5: Arquitectura general 4G.



Fuente: (H. Y. Chen, 2021)

- HLR se sustituye por un servidor de suscriptores locales (Home Subscriber Server, HSS). HSS es responsable de más o menos las mismas funciones que HLR (base de datos de perfiles de los usuarios, con sus derechos y características). Además, HSS incluye un posible enlace con el mundo IMS, para la gestión de servicios de voz mejorados.
- Un nuevo elemento de la red central 4G es la Función de Reglas de Políticas y Cargos (Policy and Charging Rules Function, PCRF), que permite la gestión dinámica de las políticas de facturación y calidad de servicio para los flujos (flujos premium con ancho de banda y latencia garantizados, tarificación dinámica en función del flujo, etc.).
- Función de Aplicación de Políticas y Cobros (Policy and Charging Enforcing Function, PCEF), módulo funcional alojado en la PDN Gateway, aplica las reglas establecidas por el PCRF.
- Por último, el Subsistema Multimedia sobre IP (IP Multimedia Subsystem, IMS), aunque en realidad no forma parte de 4G, es un conjunto de elementos que permiten ofrecer servicios multimedia en redes IP (y, por tanto, en la red móvil, entre otras). Además, IMS permitirá ofrecer servicios interpersonales multimedia enriquecidos:

voz sobre IP, videoconferencia, agenda enriquecida, mensajería instantánea, timbre en varios terminales, etc.

2.1.4.2. Técnicas de acceso en redes 4G-LTE.

Para cualquier sistema de radio móvil, es necesario definir una técnica de acceso que permita gestionar los recursos radioeléctricos disponibles. En el caso de las redes LTE-Advanced, se utiliza OFDMA en sentido descendente y SC-FDMA (acceso múltiple por división en frecuencia de una sola portadora) en sentido ascendente.

2.1.4.3. Velocidades y movilidad de la red 4G

Los requisitos de la tecnología LTE también se han centrado en el aumento de la velocidad en comparación con HSPA (High Speed Packet Access). Los objetivos de velocidad máxima de datos definidos para LTE son los siguientes:

- 100 Mbps de enlace descendente para un ancho de banda asignado de 20 MHz, es decir, una eficiencia espectral máxima de 5 bps/Hz.
- 50 Mbps de enlace ascendente para un ancho de banda asignado de 20 MHz, es decir, una eficiencia espectral máxima de 2.5 bps/Hz.

Estas cifras suponen un UE de referencia compuesto por:

- Dos antenas de recepción
- Una antena de transmisión.

La movilidad es una función clave de una red móvil. El objetivo de LTE es seguir siendo funcional para los equipos que viajan a alta velocidad (hasta 350 km/h, e incluso 500 km/h según la banda de frecuencias), al tiempo que se optimiza para velocidades bajas (entre 0 y 15 km/h). Los servicios en tiempo real, como la voz, deben ofrecerse con el mismo nivel de calidad que UMTS.

El efecto del Hannover intrasistema (procedimiento de movilidad entre dos celdas LTE) sobre la calidad de la voz debe ser menor que en GSM o equivalente. El sistema también debe incorporar mecanismos para optimizar los retrasos y la pérdida de paquetes durante los traspasos dentro del sistema. Además, LTE debe coexistir con otras tecnologías 3GPP. Para lograrlo, se han definido los siguientes requisitos.

2.1.5. Calidad de servicio en las redes móviles.

La calidad de servicio (QoS) es la capacidad de un elemento de red para proporcionar un nivel de servicio garantizado que asegure el correcto encaminamiento de los datos. Algunas aplicaciones son más exigentes que otras, como las aplicaciones en tiempo real. La QoS es una condición necesaria para el paso de multimedia. Un valor de QoS se aplica a toda una conexión de red. Debe ser idéntico en ambos extremos de la conexión.

La QoS se describe mediante parámetros. Se han definido varios parámetros de QoS, siendo los principales los siguientes:

- Retardo en el establecimiento de la conexión de red: corresponde al tiempo transcurrido entre la solicitud de conexión y la confirmación de la conexión. Este parámetro de QoS indica el tiempo máximo aceptable para el usuario.
- Probabilidad de fallo de conexión: se basa en las solicitudes de conexión fallidas.
- Tiempo de tránsito de transferencia de datos: corresponde al tiempo transcurrido entre una solicitud de transferencia de datos y la indicación de transferencia.
- Tasa de error binario: se calcula a partir del número de paquetes que llegan erróneos, perdidos o duplicados sobre el número total de paquetes enviados.
- Probabilidad de fallo de la conexión de red: se calcula a partir del número de veces que se libera o se restablece una conexión de red sobre el número de transferencias realizadas.

- Tiempo de liberación de la conexión de red: es el tiempo máximo aceptable entre la solicitud de conexión y la liberación efectiva.
- Protección de la conexión de red: determina que la conexión de red está en funcionamiento mientras esté abierta por un usuario.
- Prioridad de conexión: determina la prioridad de acceso a una conexión de red, la prioridad de mantenimiento de una conexión y la prioridad de los datos en la conexión.

2.2. Introducción de la modulación en redes móviles celular.

Según las necesidades del futuro móvil 5G, las redes deberán ofrecer un rendimiento superior al de las redes LTE-Advanced, incluyendo tasas de transmisión de datos de hasta 20 Gbps, una latencia de red de hasta 1 ms y la capacidad de servir hasta 1 millón de dispositivos por kilómetro cuadrado. El desarrollo de nuevos métodos de transmisión de datos para mejorar la eficiencia espectral ha llevado a un aumento en la cantidad de datos transmitidos en redes móviles y de alta velocidad dentro de los recursos limitados de frecuencia.

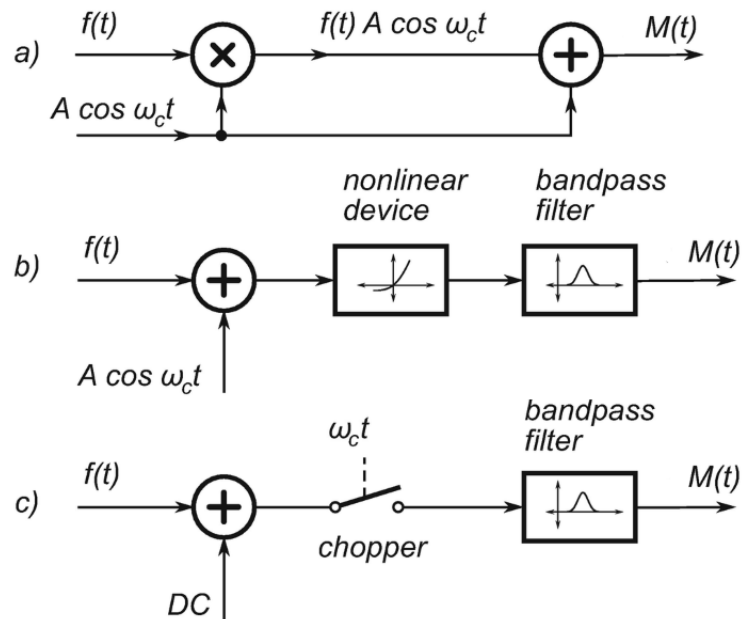
Hoy en día, la tecnología de transmisión de datos más utilizada en los sistemas inalámbricos de banda ancha es OFDM. Esta tecnología se emplea en sistemas de comunicación como LTE/LTE-Advanced e IEEE 802.11a/g/n/ac, garantizando una alta eficiencia espectral. Sin embargo, las características que proporciona OFDM en las redes 4G ya no son suficientes para satisfacer las altas demandas de las redes 5G. Por lo tanto, tecnologías prometedoras para las redes 5G incluyen multicarrier de banco de filtros (Filter Bank Multi-Carrier, FBMC) y multicarrier de filtrado universal (Universal Filtered Multi-Carrier, UFMC).

2.2.1. Principio de modulación

La modulación y la demodulación son dos etapas fundamentales en la transmisión de información entre dos usuarios. Por ejemplo, para permitir la comunicación entre dos usuarios (voz o datos) a través de una línea

telefónica. Se requieren los siguientes elementos: un ordenador, software, protocolos, un modulador y un demodulador. La línea telefónica actúa como el canal de transmisión, cuya banda pasante es limitada y está sujeta a atenuación y distorsiones. La modulación convierte la información binaria generada por los protocolos y el software en señales de tensión y corriente dentro de la línea.

Figura 2. 6: Esquemas de modulación con portadora (a) doble, (b) y filtrado, y (c) con switch y filtrado



Fuente: (Sobot, 2021)

El tipo de modulación utilizado debe adaptarse, por un lado, al tipo de señal (en este caso digital), a los requisitos de rendimiento (como la tasa de error) y, por otro lado, a las características de la línea de transmisión. Así pues, la modulación traduce el espectro del mensaje a un dominio de frecuencias más adaptado al medio de propagación y, tras la demodulación, garantiza la calidad exigida por las demás capas del sistema. El objetivo de la modulación analógica es garantizar que la información analógica (voz, música, imagen) se transmita con la calidad suficiente dentro de los límites del canal utilizado.

El objetivo de la modulación digital es garantizar el máximo caudal de datos binarios con una tasa de error aceptable. En el modelo de capas OSI (arquitectura estándar de las telecomunicaciones digitales), la modulación es el elemento principal de la capa física.

2.2.2. Ventajas de la modulación

- Facilita el acceso múltiple: al traducir el espectro de banda base de las señales de distintos usuarios para distintas bandas de frecuencia, se puede dar cabida a múltiples usuarios dentro de una misma banda del espectro electromagnético.
- Aumenta el alcance de las comunicaciones: las señales de banda base de baja frecuencia sufren atenuación y, por tanto, no pueden transmitirse a grandes distancias. La conversión a una banda de frecuencias más alta permite aumentar la distancia de transmisión.
- Reduce el tamaño de la antena: la altura de la antena es inversamente proporcional a la frecuencia de la señal radiada, por lo que radiar una señal de alta frecuencia reduce el tamaño de la antena.

2.2.3. Modulación de portadora única

Los sistemas de transmisión de portadora única transmiten datos secuencialmente en una sola banda de frecuencias o canal físico, en torno a una sola portadora. Aunque esta técnica es muy sencilla de aplicar, presenta importantes inconvenientes cuando se trata de canales multitrayecto muy selectivos.

Los múltiples trayectos del canal introducen interferencias entre símbolos (Inter-Symbol Interference, ISI) que afectan a la calidad de la transmisión. Este fenómeno es aún más pronunciado cuando el tiempo de símbolo del sistema es bajo. Para combatir esta degradación, existen en la literatura técnicas de detección y ecualización, pero ya es posible limitarla adoptando medidas preventivas en la transmisión, como formas de onda específicas que limiten las ISI y que se utilizan como medio físico de transmisión de la señal.

Por otro lado, cada símbolo de este sistema, al ocupar todo el ancho de banda de comunicación, estará sujeto a la selectividad frecuencial del canal.

Este fenómeno será más probable cuanto mayor sea el ancho de banda del sistema, es decir, cuando el tiempo de símbolo sea más corto. A la luz de estos dos fenómenos, se entiende mejor por qué esta técnica de transmisión no es adecuada para los nuevos sistemas de comunicación, que requieren un ancho de banda mayor para transportar mayores tasas de datos. Por lo tanto, deben considerarse otros sistemas de transmisión más adaptados para cumplir con las exigencias actuales en términos de velocidad.

2.2.4. Modulación multiportadora

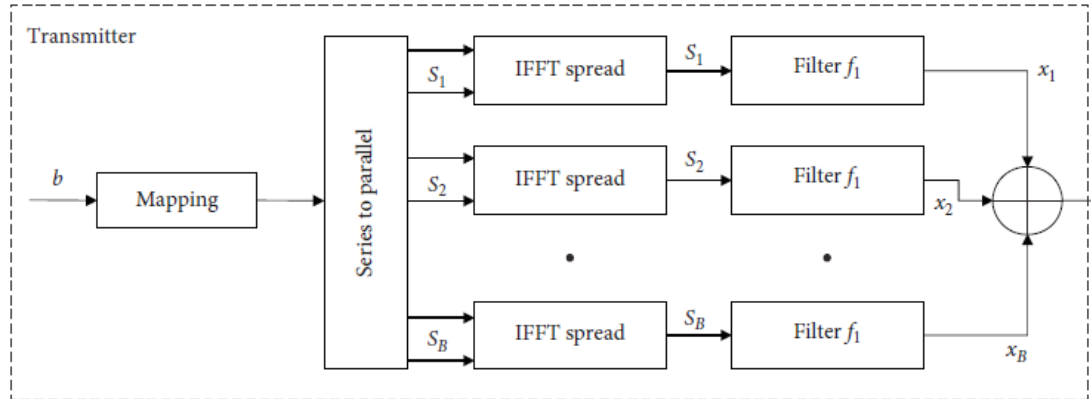
A diferencia de los sistemas de portadora única, que modulan en una sola portadora con una tasa de transmisión R_s , el principio de la modulación de múltiples portadoras del tipo OFDM consiste en transmitir los datos de manera simultánea sobre N portadoras moduladas, cada una con una tasa de transmisión de $\frac{R_s}{N}$

Aunque la tasa global de transmisión permanece sin cambios, cada portadora es menos sensible al ensanchamiento de los trayectos en el canal de propagación. La figura 2.7 describe el esquema básico de un modulador OFDM en banda base: después de un codificado Bit/Símbolos de los bits a transmitir, los símbolos complejos $\{x_i\} l = 1, 2 \dots$ se agrupan sucesivamente en bloques de tamaño N (conversión serie/paralelo), se organizan en una duración T (forma de onda $g(t)$) y luego se envían sobre las N portadoras $\{f_n\} n = N/2 \dots N/2 - 1$ para formar la señal de salida. Durante el intervalo de tiempo $[iT, (i + 1)T]$ la señal OFDM generada se expresa como:

$$S_i(t) = \sum_{n=-N/2}^{\frac{N}{2}-1} X_{i,n} g\left(t - iT - \frac{T}{2}\right) e^{j2\pi f_n t} \quad (2.1)$$

$S_i(t)$ representa el i^{eme} símbolo en el OFDM, mientras que $\{X_{i,n}\} n = -N/2 \dots N/2 - 1$ representan los N símbolos complejos $\{X_i\}$ que transporta.

Figura 2. 7: Esquema básico de un modulador OFDM.



Fuente: (Debnath et al., 2024)

La señal recibida se expresa de la siguiente manera:

$$y(t) = \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{n=-N/2}^{\frac{N}{2}-1} X_{i,n} g\left(t - iT - \frac{T}{2}\right) e^{j2\pi f_n t} + n_n(t) \quad (2.2)$$

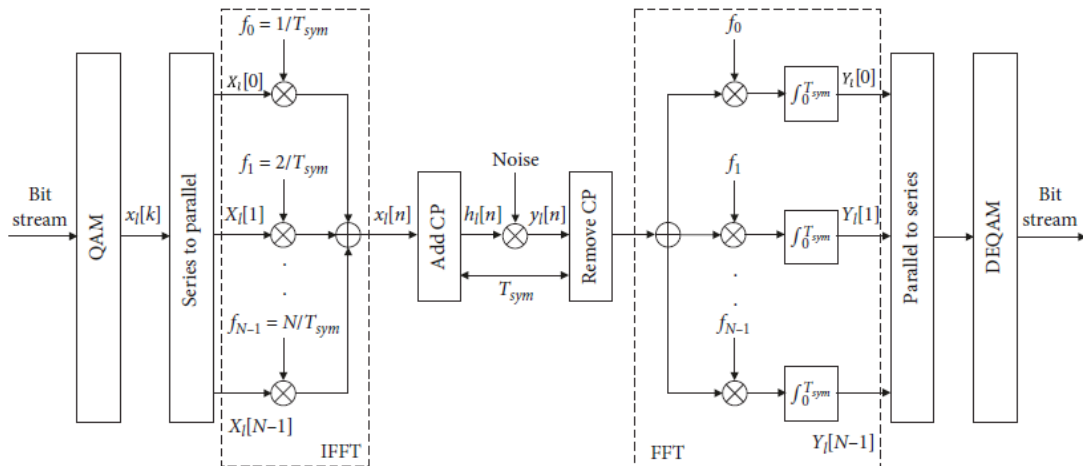
Donde $n(t)$ es el ruido blanco aditivo gaussiano introducido por el canal en la n_i ésima portadora. Los símbolos transmitidos pueden recuperarse en la recepción mediante un filtro adaptado, seguido de un muestreador. Figura 2.2 ilustra el esquema básico de un receptor OFDM.

2.3. Modulaci3n OFDM

2.3.1. Canal de transmisi3n OFDM.

La figura 2.8 muestra un diagrama de bloques simplificado de un sistema OFDM de entrada y salida 3nicas (SISO). En el lado del transmisor, los s3mbolos modulados (QAM/PSK) se asignan a N subportadoras ortogonales. Para ello se utiliza una operaci3n de transformada discreta de Fourier inversa (IDFT). A menudo, la IDFT se realiza mediante un algoritmo de transformada r3pida de Fourier inversa (IFFT) eficiente desde el punto de vista computacional. A continuaci3n, se inserta el CP y se realiza una conversi3n de paralelo a serie antes de la transmisi3n a trav3s de la interfaz a3rea.

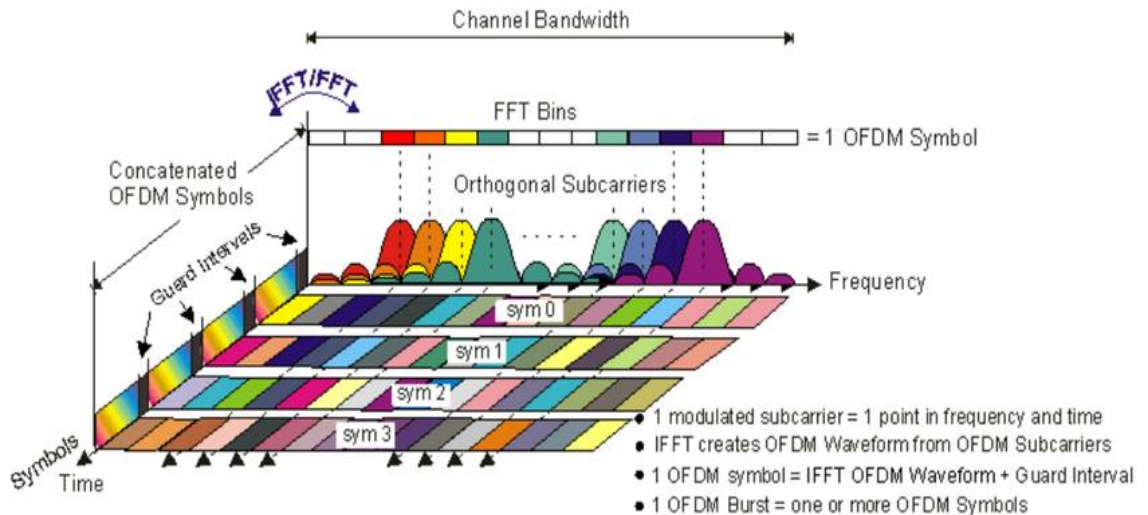
Figura 2. 8: Canal de transmisión OFDM.



Fuente: (Debnath et al., 2024)

En el receptor, se realizan las operaciones inversas. Una vez que la señal llega al receptor, se elimina el CP, que habría estado sujeto a interferencias de símbolos OFDM anteriores. A continuación, una operación de transformada rápida de Fourier (FFT) lleva los datos al dominio de la frecuencia. Esto simplifica la estimación y equalización del canal.

Figura 2. 9: Interpretación tiempo-frecuencia de una señal OFDM



Fuente: (Bharadwaja et al., 2023)

2.3.2. Modulación de cada subportadora de la señal OFDM:

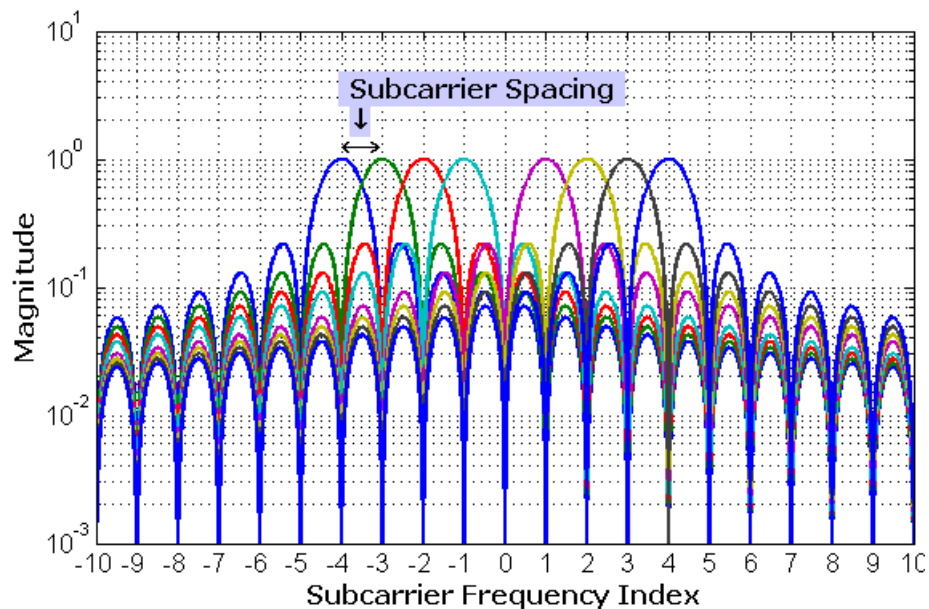
En un sistema OFDM, los bits de información de cada subportadora se modulan mediante la Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura (Quadrature Phase Shift Keying, QPSK), o QAM. La tasa de bits puede

aumentarse siempre que se incrementa el número de estados de una constelación, lo que provoca una disminución de la distancia entre puntos de constelación, lo que aumenta la sensibilidad del sistema al ruido. En general, la constelación de cada subportadora presenta un cambio aleatorio de amplitud y fase causado por el entorno multitrayecto. De las modulaciones utilizadas en un sistema OFDM, la más robusta es QPSK, que codifica 2 bits por símbolo.

2.3.3. Ortogonalidad:

La técnica de modulación OFDM permite un alto grado de solapamiento espectral entre subportadoras. Sin embargo, las portadoras deben respetar una restricción de ortogonalidad en los dominios del tiempo y la frecuencia al mismo tiempo para funcionar correctamente. La ortogonalidad se consigue si el espacio entre dos frecuencias adyacentes $f_n = \frac{1}{T_n}$. Cada símbolo modulado por una portadora durante una ventana rectangular de duración temporal, seno cardinal, representa su espectro de frecuencias.

Figura 2. 10: Espectro a la salida del modulador OFDM.



Fuente: (Mustafa & Samarah, 2017)

De este modo, no hay interferencias con las demás subportadoras, lo que permite superponer el espectro de las distintas portadoras y ocupar el espectro de forma óptima. El número de subportadoras N a fin debe elegirse

de forma que satisfaga las dos condiciones imperativas $T_s \gg T_m$ para poder considerar el canal plano, y $T_s \ll \frac{1}{B_d}$.

2.3.4. Conversión serie a paralelo:

Los datos que deben transmitirse suelen adoptar la forma de un flujo de datos periódico. En un sistema OFDM es necesaria una conversión de serie a paralelo para convertir el flujo periódico de bits en datos paralelos. Los datos asignados a cada símbolo dependen del esquema de modulación utilizado y del número de subportadoras. Por ejemplo, para una modulación MAQ-16, que transporta 4 bits de datos por símbolo, y una transmisión que emplea 50 subcanales, el número de bits por símbolo necesarios es de 200. En el receptor tendrá lugar el proceso inverso, los datos paralelos deben convertirse de nuevo en el flujo de datos periódico original.

Para la transmisión OFDM en un entorno radioeléctrico multitrayecto, la selectividad de frecuencia de los canales de propagación puede dar lugar a grupos de subportadoras muy atenuadas, lo que provoca una considerable degradación del sistema. Por lo tanto, deben tomarse medidas preventivas antes de la modulación para que la mayoría de los errores introducidos por el canal de transmisión puedan detectarse y corregirse en el receptor. Estas medidas, cuya principal consiste siempre en reintroducir redundancia en la señal, se denominan codificación de protección contra errores (Forward Error Correction, FEC) y constituyen la parte esencial de la codificación. Para que el receptor sepa dónde está el bit corrupto, el transmisor debe enviar información adicional para localizar el error. A continuación, se modula la señal.

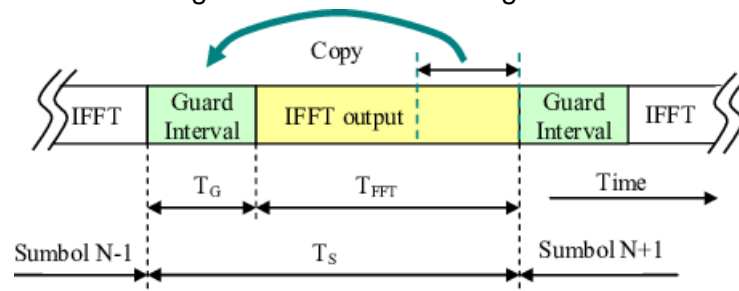
La parte del tratamiento que se ocupa de la dispersión de la energía no está destinada, en sentido estricto, a la corrección de errores, sino que se especifica en la emisión para uniformizar el espectro de RF. Para evitar largas secuencias de 0 o 1 que crearían una línea de alta energía en el espectro, la señal debe hacerse cuasi aleatoria para garantizar la distribución uniforme de

energía en el canal de emisión. Esto se consigue codificando los datos con una secuencia pseudoaleatoria. Para una decodificación correcta, el receptor debe estar equipado con el mismo generador pseudoaleatorio, que proporcione la misma secuencia y que comience al mismo tiempo.

2.3.5. Intervalo de guarda

Los símbolos están sujetos a ecos y un símbolo transmitido llega al receptor en forma de varios símbolos atenuados y retardados. Un símbolo transmitido durante un periodo iT_s puede superponerse a un eco del símbolo transmitido durante el periodo $(i-1)T_s$, en cuyo caso se producen interferencias. Para evitar estas interferencias, se añade un intervalo de guarda de duración T_g . Cada símbolo va precedido de una extensión periódica de la propia señal, por lo que la duración del símbolo total transmitido es $T = T_s + T_g$, para eliminar las interferencias.

Figura 2. 11: Intervalo de guarda.



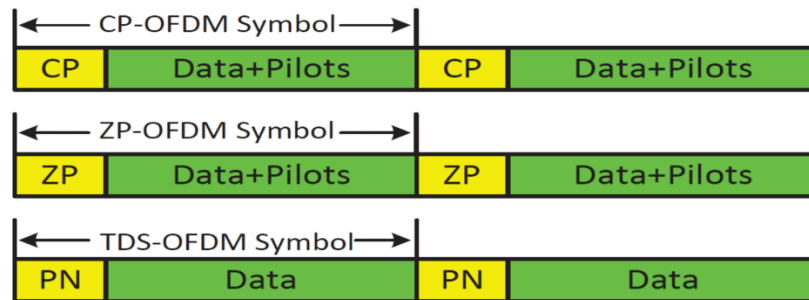
Fuente: (Nikolova et al., 2009)

Existen tres tipos de intervalo de guarda

- CP: es una técnica que consiste en insertar una copia de un bloque de información que debe transmitirse aguas arriba de la trama. Más claramente, consiste en recuperar una parte de la información a transmitir e insertar esta información al principio de la trama, lo que se denomina prefijo cíclico (CP-OFDM) (véase la Figura 2. 12.a).
- ZP: Insertar ceros en lugar del intervalo de guarda y no transmitir ninguna señal durante el intervalo de guarda, lo que se denomina zero-padding (ZP-OFDM) (véase la Figura 2. 12.b)

- TDS: Cuando el intervalo de guarda está formado por símbolos piloto, esta técnica de intervalo de guarda puede ser útil para resolver la ambigüedad de sincronización temporal que se produce con otras técnicas de intervalo de guarda (figura 2. 12.c).

Figura 2. 12: Los distintos intervalos de guarda



Fuente: (Esmail & Sun, 2022)

Pero ambos tipos de intervalo de guarda se utilizan habitualmente: ZP, CP.

2.3.6. Implementación digital de la modulación en el transmisor

En las comunicaciones de alta velocidad, las velocidades de transmisión de datos están limitadas por restricciones físicas: el ruido debido a las imperfecciones del sistema y la naturaleza física de los componentes afectan a la transmisión de la señal transmitida. En este caso, los errores de transmisión se reducen digitalizando la información. La implementación digital también ofrece la oportunidad de añadir códigos de corrección de errores para proteger la señal de las perturbaciones generadas por el canal de transmisión.

El análisis algebraico indica que la señal de salida $s(t)$ tiene la forma :

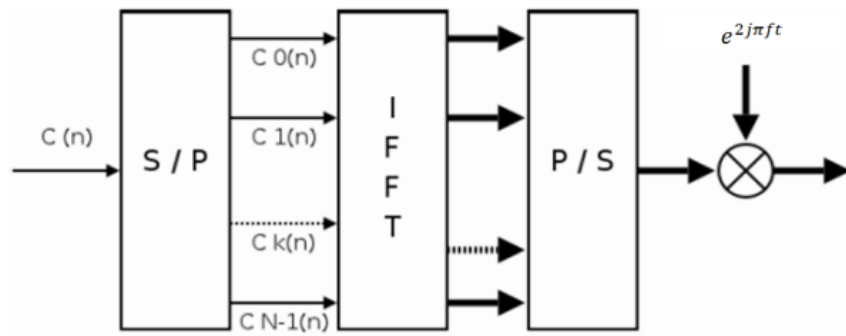
$$s(t) = e^{2j\pi f_0 t} \sum_{K=0}^{N-1} c_k e^{2j\pi \frac{kt}{T_s}} \quad (2.3)$$

Discretizando esta señal y reduciéndola a banda base para el estudio digital, obtenemos una salida $s(n)$ de la forma:

$$s_n = \sum_{K=0}^{N-1} c_k e^{2j\pi \frac{K_n}{N}} \quad (2.4)$$

Los $s(n)$ se obtienen por tanto mediante una transformada de Fourier inversa discreta de los $c(k)$. Eligiendo el número de portadoras N , el cálculo de la transformada inversa de Fourier es sencillo y puede calcularse mediante una simple IFFT que conduce al siguiente esquema de la Figura 2.13.

Figura 2. 13: Modulación OFDM digital



Fuente: (Debnath et al., 2024)

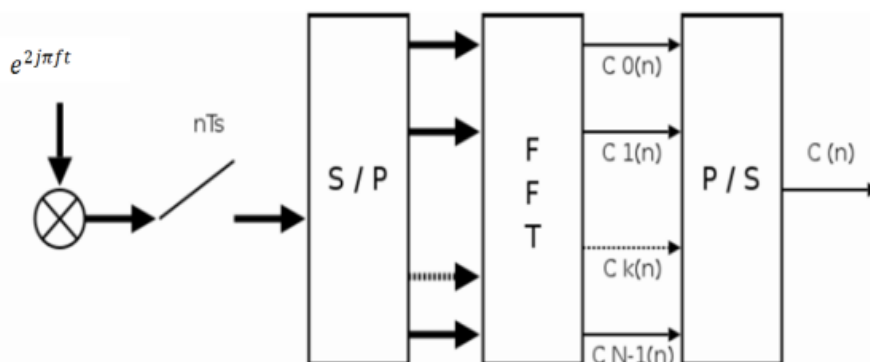
2.3.7. Implementación digital de la demodulación en el receptor.

El análisis algebraico define la señal discretizada recibida en el demodulador como

$$Z(t_n) = z\left(\frac{nT_s}{N}\right) = z_n = \sum_{k=0}^{N-1} c_k H_k e^{2j\pi \frac{k n}{N}} \quad (2.5)$$

Z_n es la transformada discreta de Fourier inversa de $c_k H_k$, por lo que la demodulación consiste en realizar una transformada discreta directa de Fourier. Una vez elegido el número de portadoras de forma que $N = 2n$, este cálculo puede realizarse mediante una FFT. El esquema es el siguiente:

Figura 2. 14: Demodulación OFDM digital



Fuente: (Debnath et al., 2024)

2.3.8. Ventajas y desventajas de OFDM

2.3.8.1. Ventajas de OFDM

La modulación OFDM presenta varias ventajas, tales como:

- Utilización óptima del ancho de banda, en comparación con la multiplexación en frecuencia convencional. Esto se debe a la ortogonalidad entre las portadoras, que se superponen sin interferirse entre sí.
- OFDM reduce la ISI debida al retardo multitrayecto al aumentar la duración del símbolo.
- Ecuación sencilla gracias al prefijo cíclico.
- Los canales se vuelven no selectivos en frecuencia, porque el ancho de banda de la señal OFDM se divide en varias sub-bandas de poca anchura y, por tanto, la respuesta del canal se considera plana en cada sub-bandas.

2.3.8.2. Desventajas de OFDM

- Varios problemas limitan la sencillez y eficacia de la técnica de modulación OFDM
- Problemas de factor de cresta: la envolvente de la señal OFDM tiene grandes picos que saturan rápidamente el amplificador de potencia.
- Problemas de sincronización: el proceso de demodulación, y en particular la operación de descodificación requiere una

sincronización muy precisa. Debemos ser capaces de encontrar los tiempos de inicio y fin de cada símbolo OFDM, y la frecuencia del receptor debe estar sincronizada con la del transmisor. Los sistemas OFDM son sensibles a los errores de sincronización.

- Las fuentes y consecuencias de estos errores pueden clasificarse como: El desajuste entre el tiempo y el periodo de muestreo considerados por el reloj del receptor y los de la señal recibida. Esto genera ISI. El desajuste de fase y frecuencia entre la portadora generada por el oscilador local y la de la señal recibida. Esto provoca interferencia entre portadoras (ICI), atenuación y desplazamientos de fase en la señal deseada.

2.4. La tecnología 5G

Las tecnologías de quinta generación (5G) IMT-2020 se acercan rápidamente y tienen un inmenso potencial transformador para mejorar nuestras vidas. Una mejor asistencia sanitaria, ciudades más inteligentes, una industria mucho más eficiente; todo esto se está haciendo posible a medida que la Internet de los objetos cobra impulso y va acompañada de una amplia gama de soluciones innovadoras que impulsan nuestra economía moderna. Sin embargo, sin las redes 5G, ninguno de estos elementos puede alcanzar todo su potencial. Pronto, de hecho, los sistemas inteligentes 5G se convertirán en esenciales para satisfacer la gran demanda de datos de los miles de millones de personas que cada día utilizan mayores cantidades de vídeo.

La 5G permitirá velocidades de transmisión de datos significativamente más rápidas, conectividad fiable y baja latencia para las Telecomunicaciones Móviles Internacionales (IMT), todo ello necesario para nuestro nuevo ecosistema global de comunicaciones de dispositivos conectados que envían grandes cantidades de datos por banda ancha ultrarrápida.

2.4.1. 5G para el internet de las cosas

La Internet de las cosas hace referencia a los avances que traerá consigo la 5G. Estos avances representan un reto importante para varios sectores de nuestra sociedad, en particular la economía. Las organizaciones están trabajando para garantizar que los operadores cumplan las normas de estos avances tecnológicos. Para garantizar el cumplimiento de estos retos y seguir el ritmo del creciente número de objetos conectados en el mercado, las redes avanzan hacia una mayor virtualización.

Además, 5G introduce nuevas arquitecturas y funcionalidades a todos los niveles. Desde el propio dispositivo hasta las aplicaciones alojadas en la nube, pasando por las distintas capas de la red. Son muchos y variados los usos a los que se destina esta tecnología. Su objetivo es simplificar la vida de las personas. Por otro lado, se han estudiado intensamente en la literatura diferentes esquemas multiportadora distintos de OFDM como forma de onda alternativa. Algunas formas de onda consideradas tanto en la industria como en el mundo académico pueden clasificarse en tres categorías principales: ortogonales complejas, ortogonales reales y formas de onda no ortogonales.

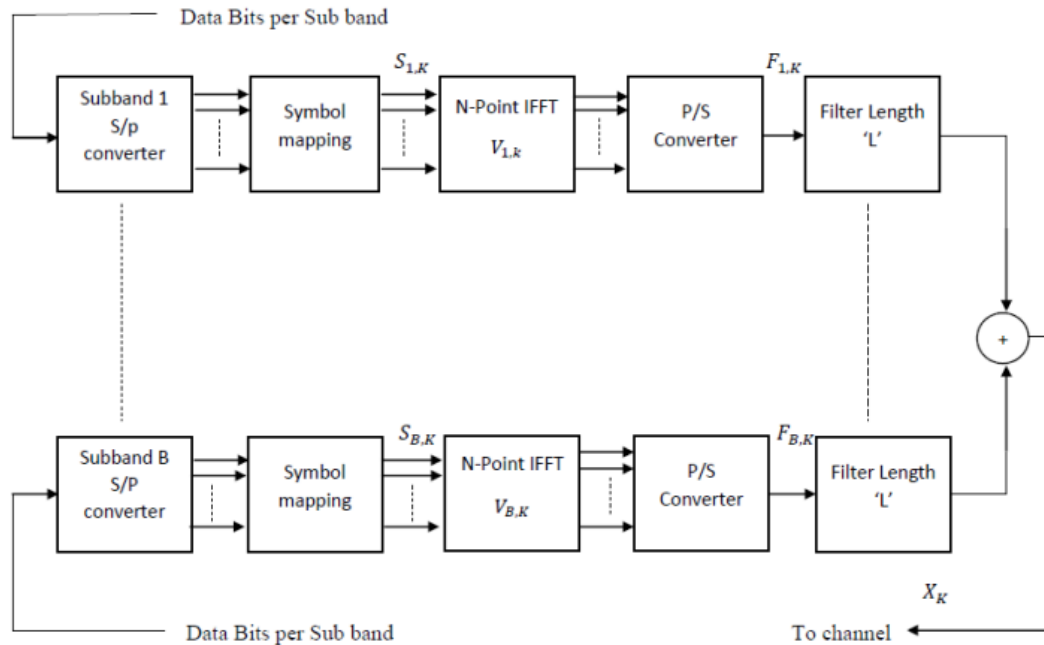
UFMC promete ser una de las mejores tecnologías candidatas para soportar la capa física de la red inalámbrica móvil de próxima generación. Sus funcionalidades son especialmente adecuadas como motor principal para escenarios de aplicaciones IoT. Además, su implementación en Open Air Interface ha llevado esta mejora también a la 4G, demostrando así su capacidad de coexistencia con la forma de onda existente y representando uno de los mejores ejemplos de integración de nuevas funcionalidades dentro de la norma actual.

2.4.2. Emisor y receptor UFMC

Esta sección describe el diagrama de bloques del transmisor y el receptor UFMC y compara UFMC con OFDM. UFMC combina las ventajas de OFDM y el grupo de filtros en FBMC. En UFMC, el ancho de banda total se

divide primero en sub-bandas. Cada sub-bandas tiene subportadoras. En lugar de filtrar cada subportadora como en la Figura 2.11 se muestra el diagrama de bloques del transmisor UFMC.

Figura 2. 15: Diagrama de bloques del transmisor UFMC

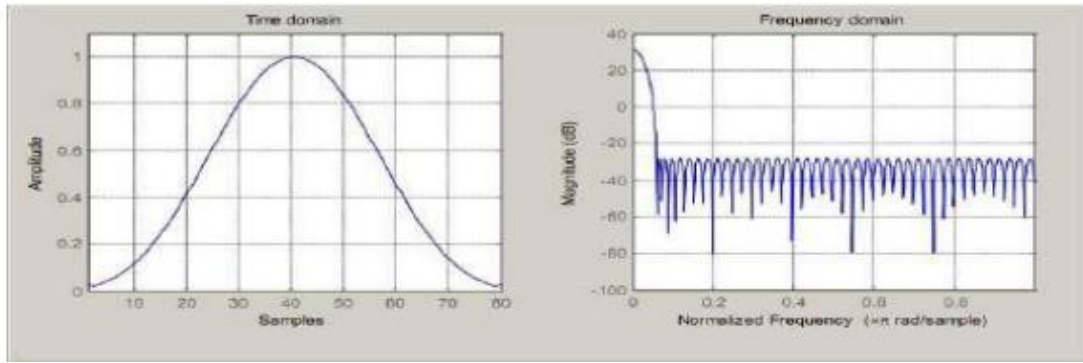


Fuente: (Debnath et al., 2024)

En UFMC, el ancho de banda total se divide primero en B sub-bandas. Cada sub-bandas tiene k subportadoras. A continuación, se asignan los bits de datos a cada sub-banda. Después, los bits de datos se convierten en paralelos. Esto se consigue utilizando un convertidor serie-paralelo. Ahora la salida del convertidor S/P se da al mapeador de símbolos.

El mapeador de símbolos asigna símbolos a los bits. La salida del mapeador de símbolos se entrega al IFFT. Aquí, el IFTF actúa como modulador. Resulta muy difícil diseñar moduladores para cada subportadora. La salida del IFFT es serializada por un convertidor paralelo-serie y esta salida será filtrada con un filtro formador de pulsos de longitud L. El filtro es un Chebyshev de longitud L. El filtro es un filtro Chebyshev, y la figura 2.15 describe las características en el dominio del tiempo y la frecuencia para determinados parámetros (longitud del filtro: 84, atenuación del lóbulo lateral: 60 dB).

Figura 2. 16: Características del filtro



Elaborado por: Autor.

La salida de cada filtro se suma y la señal resultante pasa por el canal. Los datos de entrada representados por X se convierten en B sub-bloques. Y cada sub-bloque pasa a través de N puntos IFFT que representan la matriz ' V '. La salida de IFFT se serializa y pasa a través de un filtro que representa la matriz ' F ', mediante esta técnica se puede filtrar un bloque de subportadoras. Para la sub-banda i^{th} , los bloques de datos representan con S_{ik} , la matriz IFFT con V_{ik} y el filtro con f_{ik} . La salida del banco de filtros se muestra en la ecuación:

$$x_k = \sum_{i=1}^B F_{i,k} \cdot V_{i,k} \cdot S_{i,k} \quad (2.6)$$

Donde:

- f_{ik} representa el filtro Chebyshev.
- V_{ik} Representa la matriz IFFT.
- S_{ik} Representa los bloques de datos.

$$F_{i,k} = \frac{\cos \left\{ M \cos^{-1} \left[\beta \cos \left(\frac{\pi k}{M} \right) \right] \right\}}{\cos [M \cos^{-1}(\beta)]}$$

$$\beta = \cosh \left[\frac{1}{M} h^{-1}(10^\alpha) \right], \alpha = 2,3,4$$

Donde α representa la atenuación del lóbulo lateral.

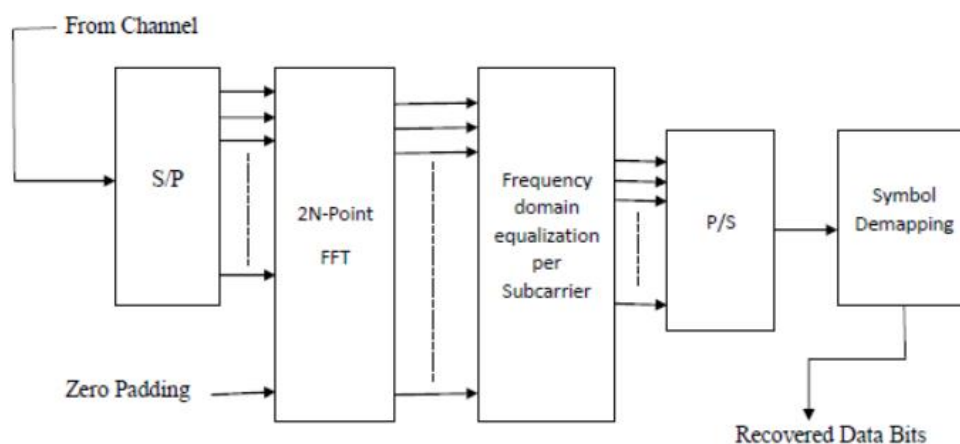
Con: $k=0,1,2,\dots,M-1$

La figura 2.12 muestra el esquema funcional del receptor UFMC. Los datos recibidos desde el canal se envían al convertidor serie-paralelo, y posteriormente pasan a través de una FFT para demodular los datos.

Después de esto, la salida de la FFT se transmite al convertidor paralelo-serie, que convierte todos los flujos de datos paralelos en un único flujo. Finalmente, el demodulador de símbolos convierte los símbolos en bits, recuperando así los datos originales.

UFMC tiene una mayor eficiencia espectral que OFDM. No hay inserción de prefijos cíclicos como en OFDM. No hay repetición de los mismos bits, por lo que utiliza todo el espectro asignado de forma eficiente. UFMC tiene menos lóbulos laterales que OFDM. Al reducirse los lóbulos laterales, también se reducen las interferencias en subportadoras adyacentes. En OFDM, la señal consta de un gran número de subportadoras moduladas independientemente que pueden dar una gran PAPR cuando se suman en fase. En UFMC, el ancho de banda total se divide en sub-bandas. Como la probabilidad de que el número de subportadoras se sumen en fase es menor en UFMC, la potencia máxima disminuye. Como resultado, la PAPR es baja para UFMC en comparación con OFDM.

Figura 2. 17: Esquema funcional del receptor UFMC.



Fuente: (Debnath et al., 2024)

2.5. Revisión del estado del arte de las técnicas de modulación en redes móviles.

En esta sección se presenta la búsqueda bibliográfica del estado del arte de las técnicas de modulación implementadas en telefonía móvil 4G y 5G. Las generaciones de telefonía móvil 1G a 3G no fueron analizadas en la presente revisión bibliográfica, porque las publicaciones de investigadores datan de más de 15 años y en este trabajo se da mayor relevancia a la tecnología 4G (actualmente utilizada en las operadoras móviles de Claro, Movistar y CNT EP) y las redes 5G utilizadas a nivel mundial y en estudio en Ecuador. En la Tabla 2.1 se muestran un resumen de los trabajos más relevantes del uso de los esquemas de modulación PSK y QAM en redes 4G (LTE) y 5G.

Tabla 2. 1: Revisión de literatura de aplicaciones de modulaciones en telefonía móvil 4G y 5G

Título del Trabajo	Resumen (Español)	Enlace/Referencia
A review on digital modulation in 4G LTE/4G LTE Advanced	Revisión de modulaciones QPSK y QAM en redes 4G LTE y su relación con OFDM, destacando mejoras en tasas de datos.	(Solano-Escorcía et al., 2022)
Evaluation of PAPR, PSD, Spectral Efficiency, BER and SNR Performance of MCM Schemes	Evalúa la eficiencia espectral y rendimiento de BER en OFDM y modulaciones QAM en redes 5G y más allá.	(Sivapriya et al., 2023)
Multi-Carrier Waveforms by Filter Bank Multi Carrier for 5G over 4G in Wireless Networks	Analiza FBMC como alternativa a OFDM en redes 5G, destacando sus beneficios sobre QAM y PSK.	(Priyanka et al., 2023)
Study and Implementation of	Investiga transceptores avanzados para 5G utilizando 256-QAM	(Mendes, 2019)

an Advanced Transceiver for 5G	con OFDM, logrando tasas de hasta 5.9 Gbps.	
Reliability Checking for Digital Modulation Schemes in 4G–5G Communication System	Compara QPSK y QAM en OFDM para determinar la confiabilidad de esquemas de modulación en redes 4G-5G.	(Md. S. Islam et al., 2015)
Development of OFDM based MIMO techniques using QPSK and MQAM	Explora técnicas MIMO basadas en OFDM, analizando diferencias entre PSK y QAM en redes 4G-5G.	(Bhagya, 2015)
Optical communications and modulation techniques in 5G	Presenta esquemas avanzados como D8PSK y PM16-QAM en comunicaciones ópticas para 5G.	(Hu et al., 2019)
A comprehensive survey 5G wireless communication systems	Revisión de desafíos en redes 5G, incluyendo el impacto de modulaciones como M-QAM y OFDM.	(Shaik & Malik, 2021)
Performance analysis of LTE codes system using various modulation techniques	Estudio de técnicas como BPSK, QPSK y QAM en OFDM, destacando su impacto en el rendimiento del sistema LTE.	(Khalifa et al., 2021)
Modulation formats and waveforms for 5G networks	Explora técnicas de modulación desde PSK hasta 1024-QAM, analizando la evolución hacia 5G.	(Johnson et al., 2023)

CAPÍTULO 3: Diseño y Análisis de Resultados

3.1. Introducción

En este capítulo se describen aspectos del sistema de multiplexación por división de frecuencias ortogonales (OFDM) y se destacan las ventajas del nuevo método de modulación multiportadora universal filtrada (Universal Filtered Multi-Carrier, UFMC) para los sistemas de comunicación inalámbrica de quinta generación (5G). La multiplexación por división ortogonal de frecuencias (OFDM) es una opción excelente para la cuarta generación (4G). Los métodos de modulación 4G presentan problemas de picos elevados en la relación de potencia media (PAPR).

Las actuales tecnologías de comunicación inalámbrica, como LTE-Advanced, adoptan la tecnología OFDM como forma de onda candidata para la interfaz aérea. Sin embargo, como ya se mencionó existen algunas limitaciones, como una PAPR alta, baja eficiencia espectral y estrictos requisitos de ortogonalidad, que inhiben significativamente el rendimiento de OFDM.

Para hacer frente a los inconvenientes de la OFDM y satisfacer los requisitos de las futuras redes de comunicaciones, se están proponiendo nuevas formas de onda tanto en la literatura como entre los organismos de normalización. Por un lado, hay propuestas para preservar OFDM como forma de onda fundamental para 5G encontrando soluciones adecuadas a algunas de sus deficiencias, haciendo que la nueva forma de onda sea compatible con las tecnologías existentes.

Las pérdidas de banda lateral son otro problema de OFDM. En la actualidad, los sistemas 4G se basan en la forma de onda OFDM, que no es capaz de soportar las diversas aplicaciones que ofrece la tecnología 5G. Se prevé que el tráfico generado por 5G tenga características y requisitos muy diferentes a los de la tecnología inalámbrica actual. Por este motivo, se incluye

otro sistema de acceso múltiple. La tecnología UFMC es la mejor forma de superar las limitaciones conocidas de OFDM.

3.2. Simulación del sistema OFDM en la red móvil 5G usando Simulink

En la Figura 3.1 se observa el diagrama de bloques del transmisor y receptor del sistema OFDM. En otras palabras, representa el proceso de generación de multiplexación por división ortogonal de frecuencias (OFDM) en el transmisor y el receptor. La característica de ortogonalidad la proporciona la transformada de Fourier, que se aplica a la señal en forma inversa y discreta como IDFT en la parte del transmisor, y en forma discreta como DFT en la parte del receptor. Como resultado de la transformada de Fourier, se producen efectos de reconstrucción y eliminación de señales, y algunos picos de señal se anulan entre sí, y otros se suman, lo que crea picos altos en el dominio temporal. El parámetro de relación pico/potencia media (PAPR) de la señal $s(t)$ puede calcularse mediante la siguiente expresión matemática:

$$PAPR_{dB} = 10 \log_{10} \frac{P_{m\acute{a}x}}{P_{media}}$$

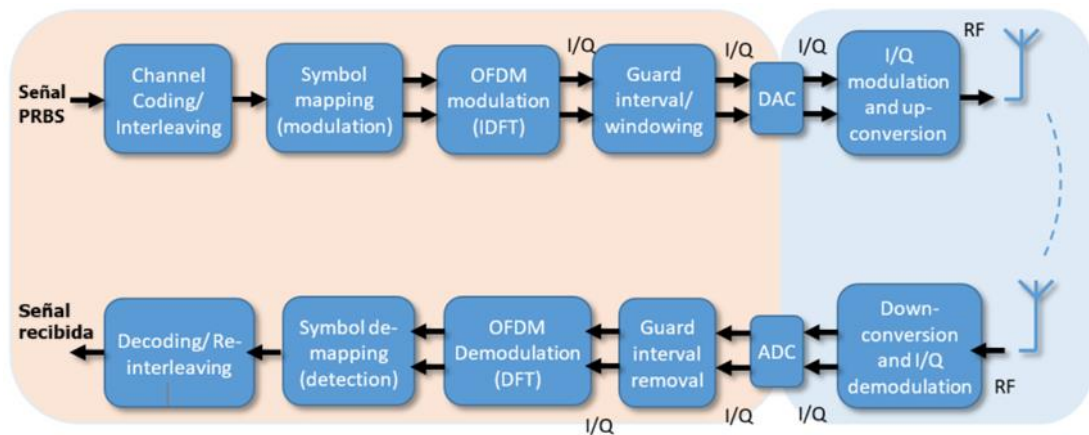


Figura 3. 1: Diagrama esquemático de transmisión/recepción en redes 5G.

Elaborado por: Autor

La Figura 3.1 muestra un diagrama de bloques simplificado del sistema OFDM de entrada y salida únicas (SISO). En el lado del transmisor, los símbolos modulados QAM/PSK (Symbol Mapping – Modulation) se asignan a N subportadoras ortogonales. Para ello se utiliza una operación de

transformada discreta de Fourier inversa (IDFT). A menudo, la IDFT se realiza mediante un algoritmo de transformada rápida de Fourier inversa (IFFT) eficiente desde el punto de vista computacional. A continuación, se inserta el intervalo de guarda y posteriormente se realiza una conversión digital-analógica (DAC) antes de la transmisión por la interfaz aérea (RF).

En el receptor se realizan las operaciones inversas. Una vez que la señal llega al receptor, se elimina el intervalo de guarda, que habría estado sujeto a interferencias de símbolos OFDM anteriores. A continuación, una operación de transformada rápida de Fourier (FFT) lleva los datos al dominio de la frecuencia. De este modo, se simplifica la estimación y ecualización del canal. En un sistema OFDM, los bits de información de cada subportadora se modulan mediante QPSK o QAM. La tasa de bits puede aumentarse incrementando el número de estados de una constelación, lo que provoca una disminución de la distancia entre los puntos de la constelación, lo que aumenta la sensibilidad del sistema al ruido.

En general, la constelación de cada subportadora presenta un cambio aleatorio de amplitud y fase causado por el entorno multitrayecto. De las modulaciones utilizadas en un sistema OFDM, la más robusta es QPSK, que codifica 2 bits por símbolo. La técnica de modulación OFDM permite un alto grado de solapamiento espectral entre subportadoras. Sin embargo, las portadoras deben respetar una restricción de ortogonalidad en los dominios del tiempo y la frecuencia al mismo tiempo para funcionar correctamente. La ortogonalidad se consigue si el espacio entre dos frecuencias adyacentes

$$f_n = \frac{1}{T_n}$$

En la Figura 3.2 se muestra el pseudocódigo (algoritmo) de simulación utilizado en MatLab/Simulink para evaluar el rendimiento de PAPR para diferentes tamaños de FFT. Este algoritmo permite evaluar el sistema OFDM con diferentes formatos de modulación QAM y QPSK en la red 5G. Posteriormente, en la secciones que siguen se muestran los análisis de los

resultados obtenidos en la simulación que se ha propuesto en la presente tesis de maestría.

Algorithm 1 Rendimiento de PAPR para Diferentes Tamaños FFT

Require: Tamaños de FFT (FFT_sizes), Vector de PAPR ($PAPR_dB$),
Número de símbolos ($num_symbols$)

Ensure: Probabilidad de $P_{APR} > P_{APR0}$ para cada tamaño de FFT
($PAPR_prob$)

1: **Inicialización:**

2: Crear matriz vacía $PAPR_prob[i][k]$ para almacenar probabilidades

3: Crear vector $prapr_values$ para almacenar valores de PAPR

4: **for** cada tamaño de FFT N en FFT_sizes **do** ▷ Iterar sobre tamaños de FFT

5: **for** $j = 1$ hasta $num_symbols$ **do** ▷ Iterar sobre símbolos OFDM

6: Generar símbolos QPSK aleatorios: $symbols \leftarrow \mathcal{N}(0, 1) + i\mathcal{N}(0, 1)$

7: Calcular señal OFDM en el tiempo: $ofdm_signal \leftarrow$
IFFT($symbols$)

8: Calcular potencia pico: $peak_power \leftarrow \max(|ofdm_signal|^2)$

9: Calcular potencia promedio: $avg_power \leftarrow \text{mean}(|ofdm_signal|^2)$

10: Calcular PAPR: $prapr_values[j] \leftarrow 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{peak_power}{avg_power} \right)$

11: **end for**

12: **for** cada valor de $PAPR_0$ en $PAPR_dB$ **do** ▷ Iterar sobre valores de PAPR

13: Calcular probabilidad acumulativa:

$$PAPR_prob[i][k] \leftarrow \frac{\text{Cantidad de símbolos con PAPR} > PAPR_0}{num_symbols}$$

14: **end for**

15: **end for**

16: **Visualización:**

17: **for** cada tamaño de FFT N en FFT_sizes **do**

18: Graficar $PAPR_dB$ en el eje x y $PAPR_prob$ en el eje y

19: Aplicar escala logarítmica en el eje y

20: **end for**

Figura 3. 2: Pseudocódigo para evaluar el rendimiento de PAPR para diferentes formatos de modulación usando la tecnología OFDM.

Elaborado por: Autor

3.3. Análisis de resultados de la relación pico/potencia media (PAPR)

PAPR es la relación entre la potencia de pico de una muestra en un símbolo de transmisión OFDM dado, dividida por la potencia media de ese

símbolo OFDM. En términos sencillos, PAPR es la relación entre la potencia máxima y la potencia media de una señal. Se expresa en unidades de dB. La PAPR se produce cuando, en un sistema multiportadora, las distintas subportadoras están desfasadas entre sí. En cada instante, difieren entre sí en distintos valores de fase. Cuando todos los puntos alcanzan el valor máximo simultáneamente, la envolvente de salida se propaga bruscamente, provocando un «pico» en la envolvente de salida.

La relación pico/potencia media (PAPR) es un parámetro crítico en la descripción de una forma de onda, como la OFDM. Las formas de onda candidatas para 5G, como FBMC, UFMC y GFDM, también se basan en OFDM. Las señales con una PAPR elevada hacen que los amplificadores de potencia funcionen principalmente en la región lineal. Esto se corresponde con una baja eficiencia energética.

En esta parte de la simulación, se compararon los valores de PAPR para los dos tipos de modulación (OFDM, UFMC), cambiaremos el orden de modulación (4QAM, 16QAM.....) para la modulación UFMC y para cada orden cambiaremos el tamaño de la FFT (128, 256, 512, y 1024), y finalmente haremos una comparación entre la modulación UFMC y OFDM para el caso de 4QAM. La Figura 3.2 muestra la variación de la PAPR para el cambio del tamaño de la FFT para la modulación 4QAM usando la tecnología OFDM.

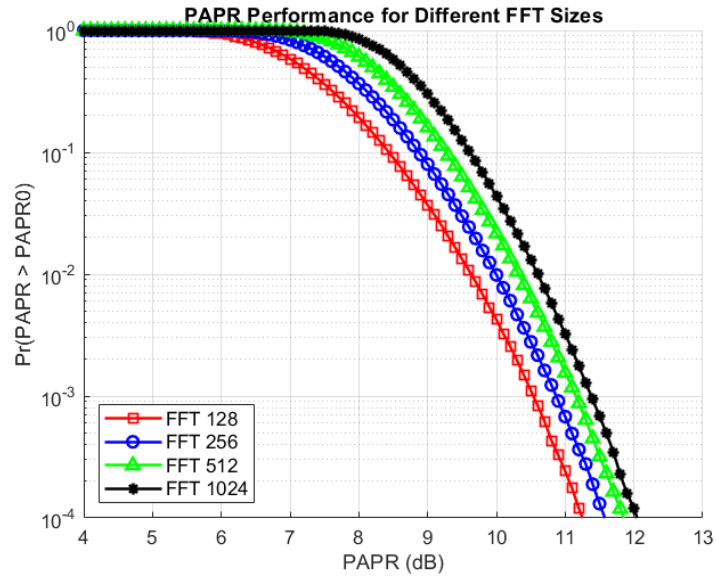


Figura 3. 3: Rendimiento de PAPR para la modulación 4QAM usando OFDM.
Elaborado por: Autor

Las siguientes figuras muestran las variaciones de PAPR a diferentes órdenes de modulación (4QAM, 16QAM, 64QAM y 256QAM).

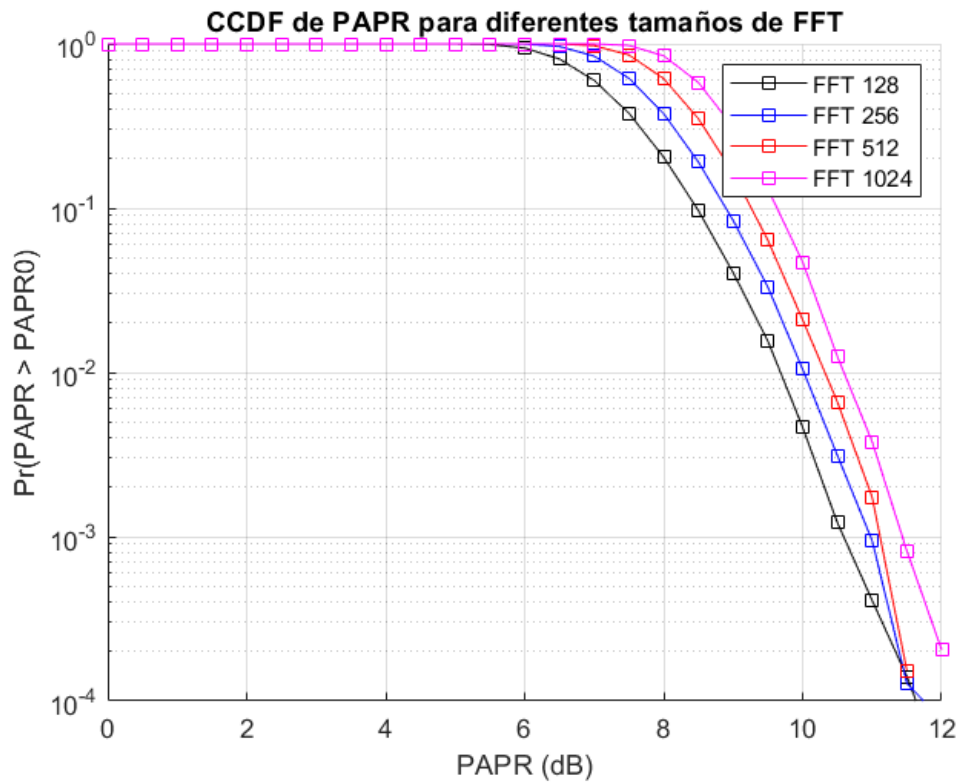


Figura 3. 4: Rendimiento de PAPR para la modulación 4QAM usando OFDM.
Elaborado por: Autor

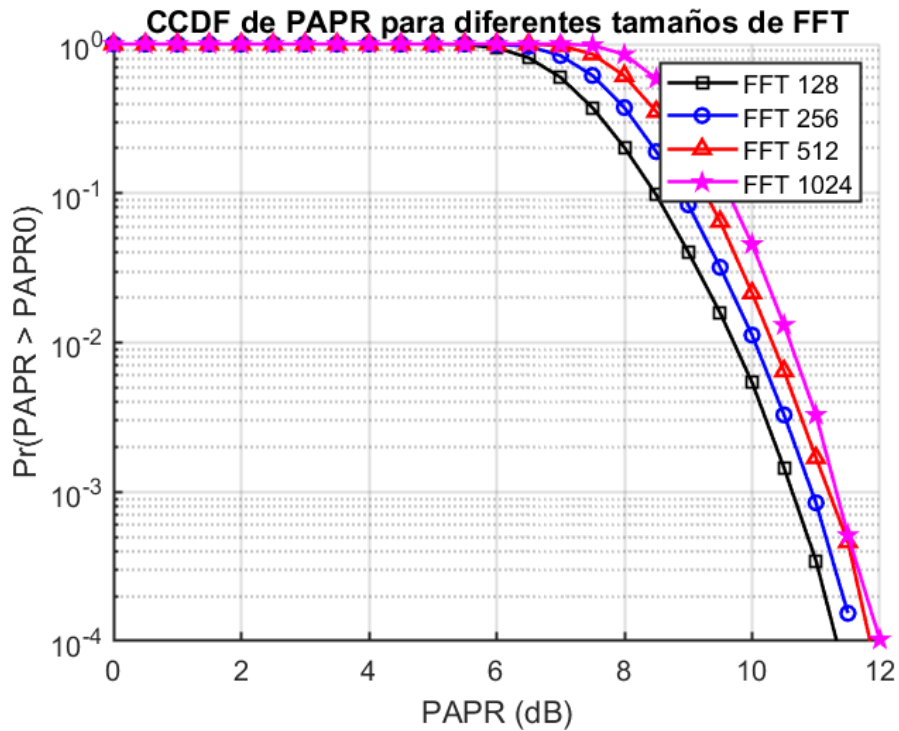


Figura 3. 5: Rendimiento de PAPR para la modulación 16QAM usando OFDM.
Elaborado por: Autor

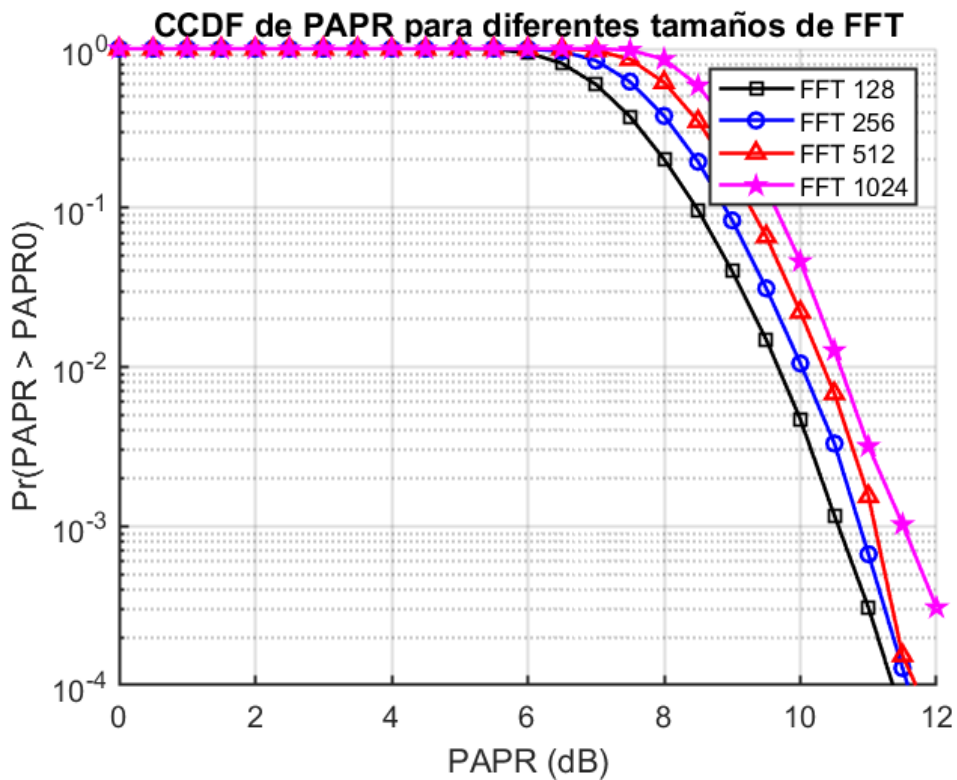


Figura 3. 6: Rendimiento de PAPR para la modulación 64QAM usando OFDM.
Elaborado por: Autor

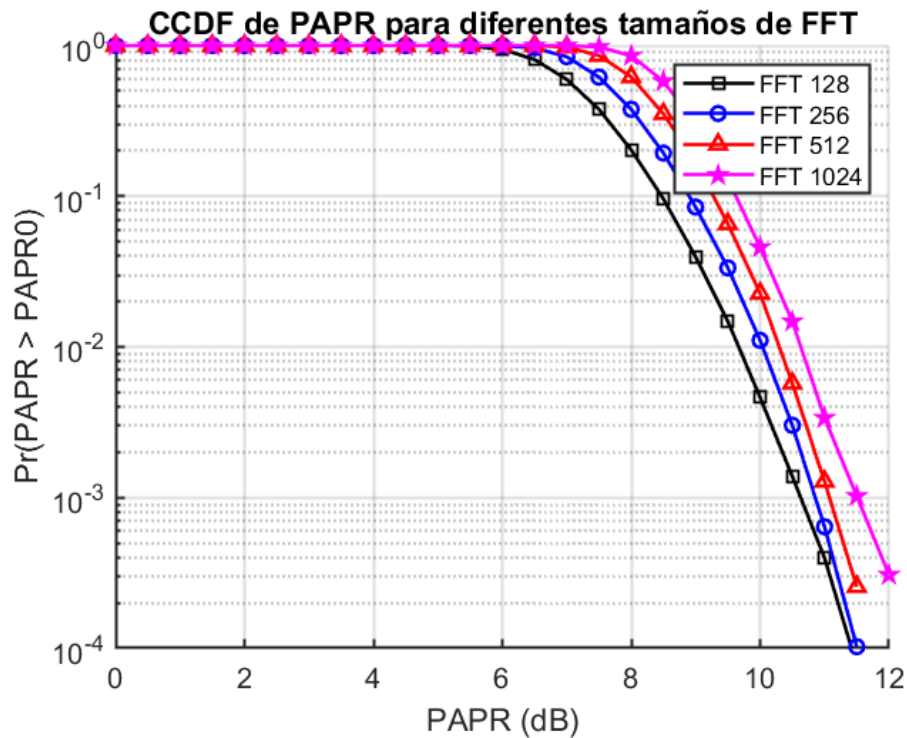


Figura 3. 7: Rendimiento de PAPR para la modulación 256QAM usando OFDM.

Elaborado por: Autor

3.3.1. Análisis de Influencia del tipo de modulación en la PAPR

En la Tabla 3.1 se muestran los datos con los mejores valores de rendimiento de PAPR utilizando las modulaciones 4QAM, 16QAM, 64QAM y 256QAM para la multiplexación OFDM y UFMC (variante de OFDM).

Tabla 3. 1: Datos recopilados de la simulación de la PAPR usando los esquemas de modulación QAM.

Modulación	Método	FFT 128 (PAPR)	FFT 256 (PAPR)	FFT 512 (PAPR)	FFT 1024 (PAPR)
4QAM	OFDM	9.8 dB	10.4 dB	10.7 dB	10.9 dB
4QAM	UFMC	10.5 dB	10.2 dB	10.0 dB	9.8 dB
16QAM	UFMC	9.7 dB	11.0 dB	10.0 dB	9.5 dB
64QAM	UFMC	10.0 dB	9.5 dB	9.4 dB	9.0 dB
256QAM	UFMC	11.0 dB	10.6 dB	9.8 dB	10.3 dB

Elaborado por: Autor

En el caso del sistema UFMC, tiene la PAPR más baja en comparación con el sistema OFDM para modulación 4QAM y todos los valores de FFT. Mientras que el valor de PAPR disminuye al aumentar el orden de modulación QAM (4QAM, 16QAM, 64QAM, 256QAM) para la modulación UFMC.

3.3.2. Análisis de influencia del número de puntos de FFT en la PAPR

Para la modulación OFDM, el valor de PAPR aumenta cada vez que aumenta el tamaño de la FFT (CCDF=10⁻⁴). En la Tabla 3.2 se muestran los valores obtenidos de la PAPR en dB para diferentes tamaños de la FFT.

Tabla 3. 2: Datos recopilados de la simulación del tamaño de la FFT en la PAPR.

FFT	PAPR (dB)
FFT 128	11.2 dB
FFT 256	11.5 dB
FFT 512	11.7 dB
FFT 1024	12.0 dB

Elaborado por: Autor

Sin embargo, los resultados de la modulación UFMC muestran que la PAPR varía aleatoriamente en función del tamaño de la FFT.

3.3.3. Influencia de los parámetros de diseño del filtro Dolph-Chebyshev en la PAPR

Las siguientes figuras explican la influencia del filtro en la variación de PAPR para FFT_512 y FFT_1024 :

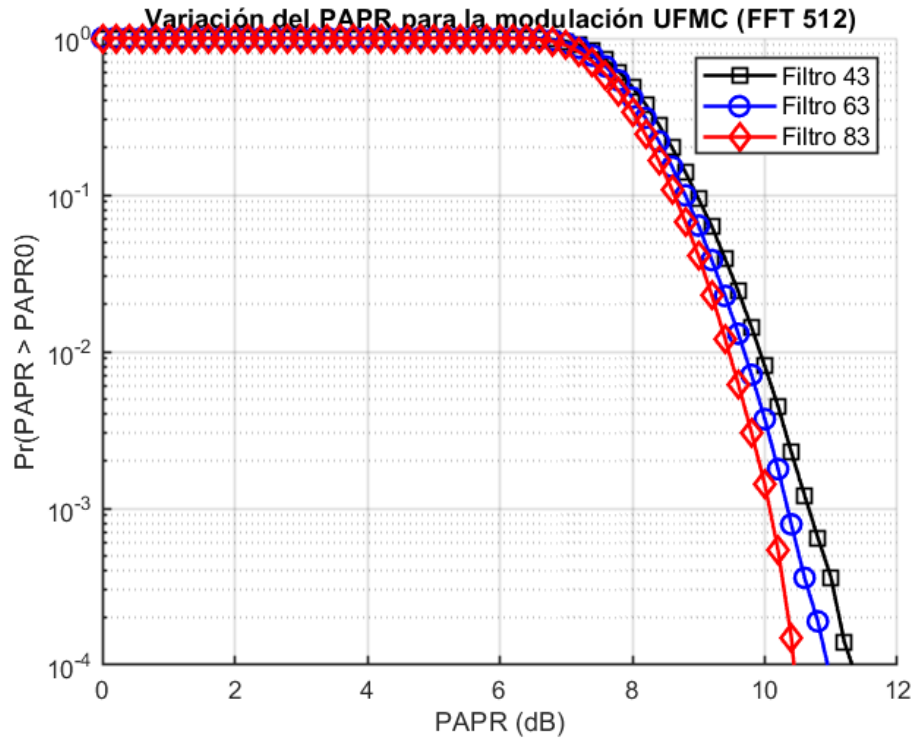


Figura 3. 8: Variación PAPR para modulación UFMC usando FFT 512.
Elaborado por: Autor

En el caso de FFT 512 (CCDF=10⁻²), que se muestra en la Figura 3.8 obsérvese que el valor de PAPR alcanza el valor más pequeño 10.4 dB si la longitud del filtro es igual a 83. Para una longitud de filtro de 43 se tiene una PAPR de 11.2 dB, mientras que para una longitud de filtro de 83 se obtuvo una PAPR de 11 dB.

En tanto que la simulación de FFT 1024 que se muestra en la Figura 3.9 se observa que el menor valor de PAPR se registra es 12 dB para una longitud de filtro de 63. Para una longitud de filtro de 43 se obtuvo una PAPR de 12 dB, y para una longitud de filtro de 83 le logró obtener una PAPR de 11 dB

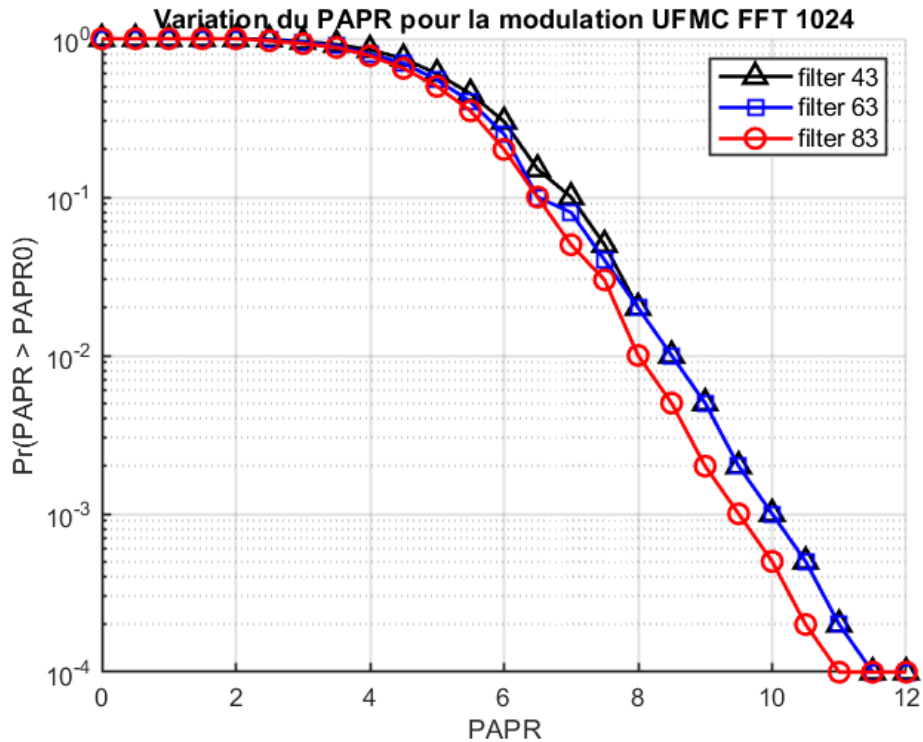


Figura 3. 9: Variación PAPR para modulación UPMC usando FFT 1024.
Elaborado por: Autor

3.4. Análisis de la tasa de error de bits (BER)

En transmisión digital, la tasa de error de bits (BER) es el porcentaje de bits con errores en relación con el número total de bits recibidos en una transmisión, normalmente expresado como diez a una potencia negativa. Por ejemplo, una transmisión puede tener una BER de 10^{-6} , lo que significa que, de 1.000.000 de bits transmitidos, un bit contenía errores.

La BER es una indicación de la frecuencia con la que un paquete u otra unidad de datos debe retransmitirse debido a un error. Una BER demasiado alta puede indicar que una velocidad de transmisión de datos más lenta mejoraría en realidad el tiempo total de transmisión para una cantidad dada de datos transmitidos, ya que la BER podría reducirse, disminuyendo así el número de paquetes que hay que reenviar.

$$BER = \frac{N_{BitError}}{N_{BitTx}}$$

En este escenario se estudia la variación de la BER para diferentes órdenes de modulación QAM (4, 16, 32, 64, 128 y 256QAM) tanto para OFDM como para UFMC y se cambia el tamaño de la FFT para cada modulación. La Figura 3.10 muestra las variaciones de BER en modulación OFDM para diferentes órdenes de modulación.

3.4.1. Influencia del tipo de modulación QAM en la BER

En la Figura 3.10 se puede observar la BER vs SNR para diferentes esquemas de modulación QAM en una red 5G usando sistemas OFDM. Se puede observar que cada vez que disminuye la BER aumenta la SNR. Este resultado es lógico, porque a mayor SNR, la señal puede verse menos afectada por interferencias y, por tanto, los errores de transmisión son mínimos.

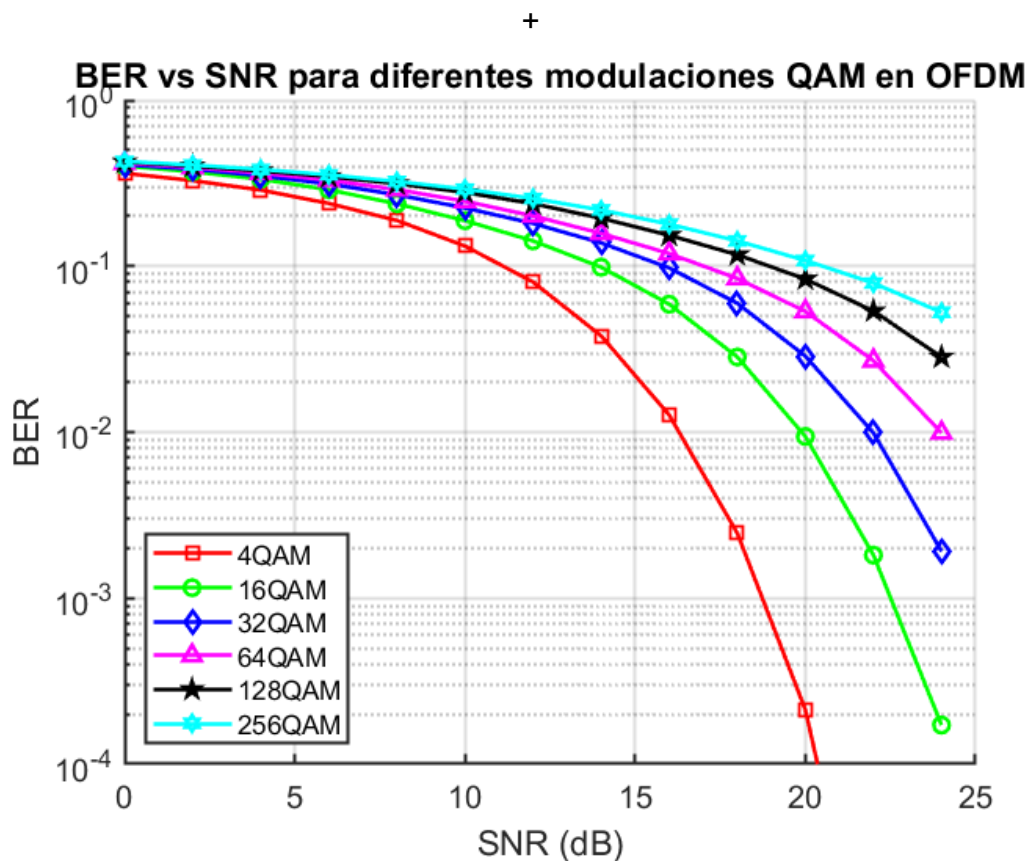


Figura 3. 10: Variaciones de la BER para diferentes esquemas de QAM en OFDM.
Elaborado por: Autor

También se observa, que cada vez que aumenta el orden de modulación, aumenta la SNR. En el caso de la modulación 4-QAM+, la BER disminuye con una SNR más baja en comparación con la modulación 256-QAM. La causa es que las modulaciones de orden inferior emplean una menor cantidad de bits por símbolo, haciéndolas más resistentes al ruido, pero menos eficaces en términos de velocidad de transmisión de datos.

La tecnología QAM de orden inferior por ejemplo 4-QAM y 16-QAM son más adecuadas para escenarios con canales deficientes o una SNR baja, pues permiten una transmisión de datos de calidad con errores mínimos. Mientras que los esquemas QAM de orden superior por ejemplo 128-QAM o 256-QAM se utilizan en la transmisión de datos de alta velocidad siempre que las condiciones del canal sean óptimas y que la SNR sea suficientemente alta.

En la tabla 3.3 se muestran el resumen de los resultados de la BER vs SNR para diferentes esquemas de modulación QAM en una red 5G mediante sistemas OFDM.

Tabla 3. 3: Datos recopilados de la simulación de la BER usando diferentes esquemas de modulación QAM para OFDM

Modulación QAM	BER	SNR
4-QAM	10^{-4}	20.5 dB
16-QAM	9.5×10^{-3}	24 dB
32-QAM	9×10^{-2}	13 dB
64-QAM	10^{-2}	14.8 dB
128-QAM	8×10^{-1}	16.8 dB
256-QAM	5.8×10^{-1}	19 dB

Elaborado por: Autor

En la Figura 3.11 se puede observar la BER vs SNR para diferentes esquemas de modulación QAM en una red 5G usando sistemas UFMC. Al igual que con OFDM, cada vez que disminuye la BER, aumenta la SNR. También se observa que cada vez que el orden de modulación varía, la SNR toma un valor más alto y la BER disminuye lentamente y más lentamente que

la modulación OFDM. En los sistemas de comunicación móvil, es un comportamiento típico, pues una SNR más alta reduce el impacto del ruido en la señal transmitida, y por tanto hay menos errores.

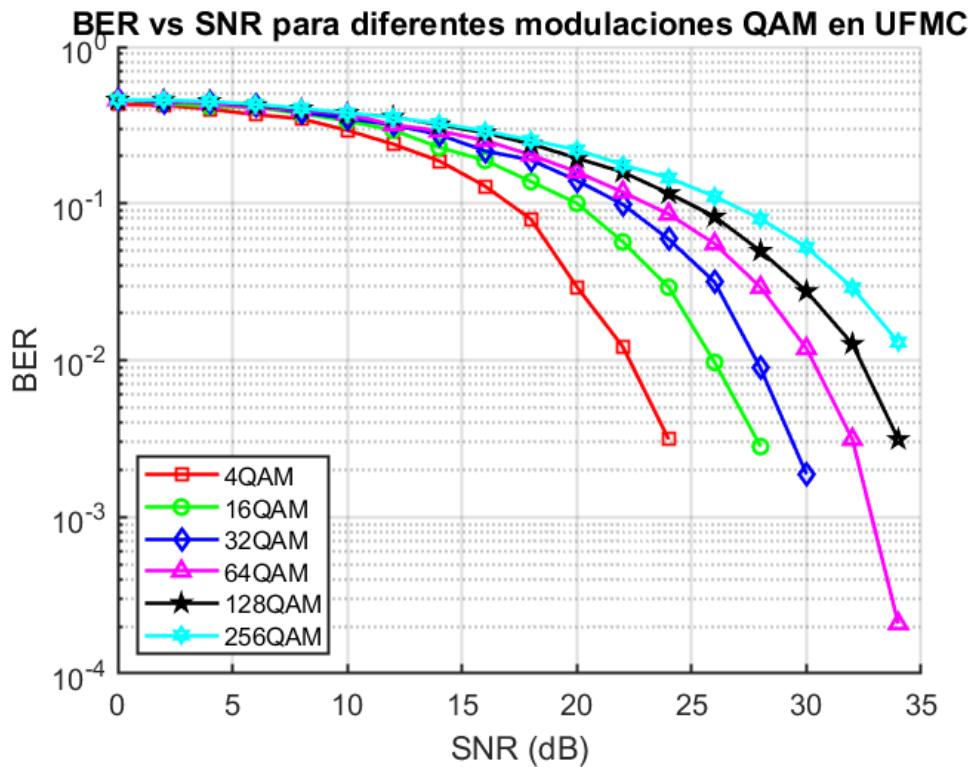


Figura 3. 11: Variaciones de la BER para diferentes esquemas de QAM en OFDM. Elaborado por: Autor

En la Tabla 3.4 se muestran los datos resumidos de la simulación de la BER para diferentes formatos de modulación QAM utilizando sistemas UFMC en redes móviles 5G.

Tabla 3. 4: Datos recopilados de la simulación de la BER usando diferentes esquemas de modulación QAM para UFMC

Modulación QAM	BER	SNR
4-QAM	7.8×10^{-2}	24 dB
16-QAM	8.2×10^{-2}	27 dB
32-QAM	9×10^{-2}	30 dB
64-QAM	9×10^{-3}	33.8 dB
128-QAM	7.7×10^{-2}	34.2 dB
256-QAM	9.6×10^{-1}	34.3 dB

Elaborado por: Autor

3.4.2. Influencia del tipo de modulación PSK en la BER

La Figura 3.12 muestra la BER vs SNR para los diferentes esquemas de modulación PSK (4-PSK, 8-PSK, 16-PSK, 32-PSK y 64-PSK) en redes 5G usando el sistema OFDM. Se puede observar que la BER disminuye al incrementarse la SNR, y esto sucede en todos los formatos de modulación de PSK. Esto demuestra una mejora del rendimiento significativa debido a la disminución del ruido en la señal.

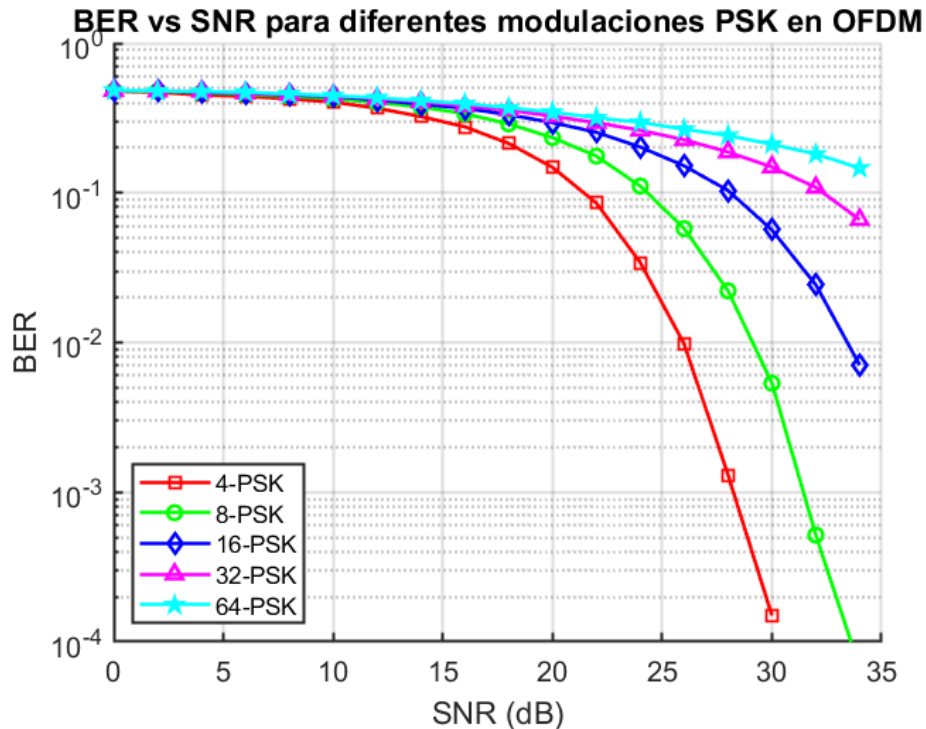


Figura 3. 12: Variaciones de la BER para diferentes esquemas de PSK en OFDM.
Elaborado por: Autor

Como se puede apreciar en la Figura 3.12, los mejores valores de BER se dan en los formatos 4-PSK y 8-PSK. Para el esquema 4-PSK, se tiene una BER de 9.5×10^{-3} con una SNR de 30 dB. Mientras que para 8-PSK, la BER es 10^{-4} con una SNR de 33.5 dB. Los valores más altos de BER se dan en los formatos de modulación 16-PSK, 32-PSK y 64-PSK, cuyos valores de SNR respectivamente son, 34, 34.2 y 34.3 dB.

Ahora, la Figura 3.13 muestra la BER vs SNR para los diferentes esquemas de modulación PSK en redes 5G usando el sistema UFMC. De

manera similar a OFDM, se observa que la BER disminuye cuando aumenta la SNR en todos los formatos de modulación de PSK. Esto demuestra una mejora del rendimiento significativa debido a la disminución del ruido en la señal. Para las modulaciones de orden inferior, como el caso de 4-PSK se observa una BER de 10^{-4} para una SNR de 11.5 dB, mientras que el esquema 8-PSK se obtuvo el mismo BER de 4-PSK, pero con una SNR de 14.8 dB.

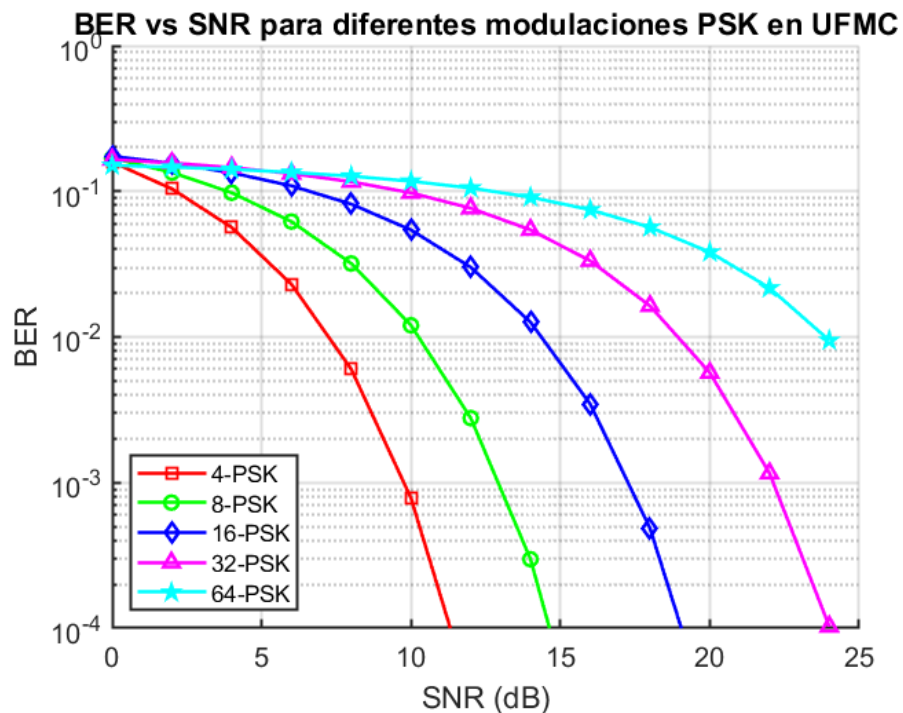


Figura 3. 13: Variaciones de la BER para diferentes esquemas de PSK en UFM. Elaborado por: Autor

En el caso de los formatos de modulación de orden superior, se observa que los esquemas de modulación 16-PSK y 32-PSK registran la misma BER de 10^{-4} , pero con una SNR de 19.2 dB y 24.2 dB, respectivamente. La modulación 64-PSK resultó ser la de menor rendimiento, ya que logró una BER de 1.5×10^{-2} para una SNR de 24.3 dB.

Conclusiones

- A lo largo del presente trabajo investigativo, se ha descrito todas las generaciones de telefonía móvil, que se han desarrollado para garantizar un mejor rendimiento en términos de BER y PAPR. Estos importantes avances han dado lugar a nuevas aplicaciones como la videoconferencia, la videotelefonía, la transmisión de datos a muy alta velocidad (vídeo 4K) y el Internet de las cosas (IoT). Las tecnologías de telecomunicaciones evolucionan constantemente y, tras la red móvil 4G, se habla ahora de la quinta generación (5G), que es la red móvil más contemporánea.
- La multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM) es una parte esencial de la tecnología 5G. OFDM es un formato de modulación que codifica las ondas aéreas de banda alta incompatibles con 4G y ofrece una menor latencia y una mayor flexibilidad en comparación con las redes LTE.
- En el desarrollo del capítulo 2 se describieron aspectos de los sistemas de multiplexación por división de frecuencias ortogonales (OFDM), y de multiportadora universal filtrada (UFMC) en la que se mostraron las ventajas de la tecnología OFDM y UFMC para los emergentes sistemas de comunicaciones inalámbricas de quinta generación (5G). Aunque, el sistema de acceso múltiple UFMC presentaba mejoras significativas en tener una PAPR menor que OFDM.
- Finalmente, puede concluirse que la quinta generación es la tecnología celular más moderna. Ha sido desarrollada para incrementar la velocidad de transmisión de las redes móviles. La tecnología 5G puede gestionar miles de veces más tráfico que las redes ya en uso. Es 10

veces más rápido que el 4G, por lo que esperamos que esté al alcance de todos.

Recomendaciones

- Desarrollar algoritmos de optimización de Edge Computing para aplicaciones del IoT de baja latencia en redes 5G.
- Integración de técnicas de IA y Machine Learning para la detección, predicción y prevención de ciberataques en tiempo real para garantizar el funcionamiento de redes 5G.

Bibliografía

- Ahmadi, S. (2016). Wireless broadband standards and technologies. En *Academic Press Library in Mobile and Wireless Communications* (pp. 559–619). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-398281-0.00015-6>
- Allelco. (2024). *The Basics of GSM Network Design and Infrastructure*. <https://www.allelcoelec.com/blog/the-basics-of-gsm-network-design-and-infrastructure.html>
- Arapinis, M., Mancini, L. I., Ritter, E., & Ryan, M. D. (2017). Analysis of privacy in mobile telephony systems. *International Journal of Information Security*, 16(5), 491–523. <https://doi.org/10.1007/s10207-016-0338-9>
- Bakare, B. I., & Ekolama, S. M. (2021). Preventing Man-in-The-Middle (MiTM) Attack of GSM Calls. *European Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 5(4), Article 4. <https://doi.org/10.24018/ejece.2021.5.4.336>
- Bhagya, R. (2015). *Development of OFDM based MIMO techniques using QPSK and MQAM modulation for high speed Network applications* [Doctoral Thesis, Kuvempu University]. <http://kuls-ir.kuvempu.ac.in/1644/1/t-3628.pdf>
- Bharadwaja, B., Swagath, J., Charan, E. R., & Sandeep, V. (2023). Performance Analysis of OFDM under Rician Fading Channel using Various Digital Modulation Methods. *International Journal of Research In Science & Engineering*, 36, 31–42. <https://doi.org/10.55529/ijrise.36.31.42>

- Chataut, R., & Akl, R. (2020). Massive MIMO Systems for 5G and beyond Networks—Overview, Recent Trends, Challenges, and Future Research Direction. *Sensors*, 20(10), 2753. <https://doi.org/10.3390/s20102753>
- Chen, H. Y. (2021). *Domain-specific Threat Modeling for Mobile Communication Systems* [Master's Thesis]. Aalto University.
- Chen, Y., Bayesteh, A., Wu, Y., Ren, B., Kang, S., Sun, S., Xiong, Q., Qian, C., Yu, B., Ding, Z., Wang, S., Han, S., Hou, X., Lin, H., Visoz, R., & Razavi, R. (2018). Toward the Standardization of Non-Orthogonal Multiple Access for Next Generation Wireless Networks. *IEEE Communications Magazine*, 56(3), 19–27. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2018.1700845>
- Chernyshev, M., Zeadally, S., Baig, Z., & Woodward, A. (2017). Mobile Forensics: Advances, Challenges, and Research Opportunities. *IEEE Security & Privacy*, 15(6), 42–51. <https://doi.org/10.1109/MSP.2017.4251107>
- Debnath, S., Ahmed, S., & Alam, S. M. S. (2024). Analysis of Filtered Multicarrier Modulation Techniques Using Different Windows for 5G and Beyond Wireless Systems. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2024, 1–15. <https://doi.org/10.1155/2024/9428292>
- Esmail, H., & Sun, H. (2022). Energy Harvesting for TDS-OFDM in NOMA-Based Underwater Communication Systems. *Sensors*, 22(15), 5751. <https://doi.org/10.3390/s22155751>
- Faruque, S. (2019a). *Radio Frequency Multiple Access Techniques Made Easy*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-91651-4>
- Faruque, S. (2019b). Time Division Multiple Access (TDMA). En S. Faruque, *Radio Frequency Multiple Access Techniques Made Easy* (pp. 35–43).

Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-91651-4_4

Fraga-Lamas, P. (2017). *Enabling technologies and cyber-physical systems for mission-critical scenarios* [Doctoral Thesis, Universidad de La Coruña]. <https://ruc.udc.es/dspace/handle/2183/19143>

Ghosh, R. K. (2017). GSM, GPRS and UMTS. En R. K. Ghosh, *Wireless Networking and Mobile Data Management* (pp. 55–94). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-3941-6_3

Gkonis, P. K., Trakadas, P. T., & Kaklamani, D. I. (2020). A Comprehensive Study on Simulation Techniques for 5G Networks: State of the Art Results, Analysis, and Future Challenges. *Electronics*, 9(3), 468. <https://doi.org/10.3390/electronics9030468>

Holma, H., Toskala, A., & Nakamura, T. (2024). *5G technology: 3GPP evolution to 5G-advanced* (Second edition). John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/9781119816058>

Hu, Y., Wang, Y., & Chee, K. W. A. (2019). Optical Communications and Modulation Techniques in 5G. En E. Kabalci & Y. Kabalci (Eds.), *Smart Grids and Their Communication Systems* (pp. 401–464). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-1768-2_12

Imam-Fulani, Y. O., Faruk, N., Sowande, O. A., Abdulkarim, A., Alozie, E., Usman, A. D., Adewole, K. S., Oloyede, A. A., Chiroma, H., Garba, S., Imoize, A. L., Baba, B. A., Musa, A., Adediran, Y. A., & Taura, L. S. (2023). 5G Frequency Standardization, Technologies, Channel Models, and Network Deployment: Advances, Challenges, and Future Directions. *Sustainability*, 15(6), 5173. <https://doi.org/10.3390/su15065173>

Irving, P., & Ochang, P. A. (2016). Evolutionary Analysis of GSM, UMTS and LTE Mobile Network Architectures. *World Scientific News*, 54, 27–39.

- Islam, Md. S., Amin, A. A., Paul, S., & Tahmid, I. (2015). Reliability Checking for Digital Modulation Schemes in 4G - 5G Communication system: Comparison between QPSK and QAM Modulation Techniques for Beyond LTE. *Proceedings of the Sixth International Conference on Computer and Communication Technology 2015*, 442–446. <https://doi.org/10.1145/2818567.2818690>
- Islam, T. (2016). *BTS, GSM & 3G Services & Network Overview of Grameenphone Bangladesh LTD*. [Thesis, East West University]. <http://dspace.ewubd.edu:8080/handle/123456789/1804>
- Jiang, W., & Han, B. (2024). Global System for Mobile Communications (GSM). En W. Jiang & B. Han, *Cellular Communication Networks and Standards* (pp. 37–51). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-57820-5_4
- Johnson, O. A., Odufeko, G. T., & Allen, A. A. (2023). A comprehensive exploration of modulation techniques and enabling technologies in communication systems: From analog to digital carriers. *International Journal of Nature and Science Advance Research*, 2(1), 239–250.
- Khalifa, O. O., Ahmed, Z., Esgiar, A. N., Saeed, R. A., & Abdalla, A. H. (2021). Performance Analysis of LTE Codes System Using Various Modulation Techniques. *2021 National Computing Colleges Conference (NCCC)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/NCCC49330.2021.9428787>
- Kheddar, H. (2022). *From 2G to 4G Mobile Network: Architecture and Key Performance Indicators* (Versión 1). arXiv. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2210.00642>
- Koi-Akrofi, G. Y., Kuuboore, M., Odai, D. A., & Kotey, A. N. (2022). Telecommunications Wireless Generations: Overview, Technological Differences, Evolutional Triggers, and the Future. *International Journal*

of *Electronics and Telecommunications*, 105–114.
<https://doi.org/10.24425/ijet.2023.144338>

Kotte, B. T. (2016). *Analysis and Experimental Verification of Diameter Attacks in Long Term Evolution Networks*.
<https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-190124>

Kukushkin, A. (2018). *Introduction to Mobile Network Engineering: SGM, 3G-WCDMA, LTE and the Road to 5G* (1a ed.). Wiley.
<https://doi.org/10.1002/9781119484196>

Li, H. (2016). Basics of communications. En *Communications for Control in Cyber Physical Systems* (pp. 9–30). Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801950-4.00002-0>

Lin, X. (with Lee, N.). (2021). *5G and Beyond: Fundamentals and Standards*. Springer International Publishing AG.

Liyanage, M., Ahmad, I., Abro, A. B., Gurtov, A., & Ylianttila, M. (Eds.). (2018). *A Comprehensive Guide to 5G Security* (1a ed.). Wiley.
<https://doi.org/10.1002/9781119293071>

Logvinov, V. V., & Smolskiy, S. M. (2022). Systems and Networks of Wireless Communication. En V. V. Logvinov & S. M. Smolskiy, *Radio Receivers for Systems of Fixed and Mobile Communications* (pp. 51–119). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-76628-3_2

Mallikharjuna Rao, N., Venkata Subbaiah, P., & Sasidhar, C. (2023). Measurement of Analytical Performance of Sliding Window Algorithm of Mobile Switching Center in Global System for Mobile Communication Network. En J. C. Bansal, H. Sharma, & A. Chakravorty (Eds.), *Congress on Smart Computing Technologies* (Vol. 351, pp. 445–454). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-99-2468-4_34

- Manos, D. (2019). *Security and Privacy in the Air interface of cellular networks* [Doctoral Thesis, University of Piraeus]. https://dione.lib.unipi.gr/xmlui/bitstream/handle/unipi/11964/MANOS_MTE1621.pdf?sequence=1
- Melero, J., Romero, R. G., & Halonen, T. (Eds.). (2003). *GSM, GPRS, and EDGE performance: Evolution towards 3G/UMTS* (2nd ed). J. Wiley. <https://doi.org/10.1002/0470866969>
- Mendes, D. R. (2019). *Study and Implementation of an Advanced Transceiver for 5G* [Master's Thesis]. University Institute of Lisbon.
- Munir, S. A., Ren, B., Jiao, W., Wang, B., Xie, D., & Ma, J. (2007). Mobile Wireless Sensor Network: Architecture and Enabling Technologies for Ubiquitous Computing. *21st International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops (AINAW'07)*, 113–120. <https://doi.org/10.1109/AINAW.2007.257>
- Mustafa, A., & Samarah, K. (2017). Adjacent Channel Interference Reduction in OFDM Systems. *Jordanian Journal of Computers and Information Technology*, 1. <https://doi.org/10.5455/jjcit.71-1493637656>
- Nikolova, Z., Iliev, G., Ovtcharov, M., & Poulkov, V. (2009). Narrowband Interference Suppression in Wireless OFDM Systems. *African Journal of Information & Communication Technology*, 5(1). <https://doi.org/10.5130/ajict.v5i1.1120>
- Pàmies, M. (2017). *GSM Sensor: Passive detection of mobile phone users* [Thesis]. Technische Universität Wien.
- Pasarelska, T., & Pasarelski, R. (2022). The key moment in the genesis of mobile cellular systems. Control of radio links in universal mobile cellular systems. *Yearbook Telecommunications*, 9, 69–77. <https://doi.org/10.33919/YTelecomm.22.9.7>

- Pathan, M. F. R. (2016). *Performance Improvement of GSM System through the Analysis of Key Performance Indicator for QoS* [Thesis, East West University]. <http://dspace.ewubd.edu:8080/handle/123456789/2196>
- Ponnimbaduge Perera, T. D., Jayakody, D. N. K., Sharma, S. K., Chatzinotas, S., & Li, J. (2018). Simultaneous Wireless Information and Power Transfer (SWIPT): Recent Advances and Future Challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 20(1), 264–302. <https://doi.org/10.1109/COMST.2017.2783901>
- Priyanka, M., Tirumala, R. H., Varma, S. A., Ram, S. A., & Ganesh, B. (2023). *Multi-carrier waveforms by filter bank multi carrier for 5G over 4G in Wireless Networks*. 13(4), 14.
- Rana, H. (2020). *Core Radio Resource Management in GSM Networks* [Thesis]. Jaypee University of Information Technology.
- Ratul, R. H., & Wang, H.-C. (2023). Cellular Communication Network Evolution and the Reliability of System Design from 1G to 6G. En I. Woungang & S. K. Dhurandher (Eds.), *5th International Conference on Wireless, Intelligent and Distributed Environment for Communication* (Vol. 174, pp. 165–187). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-33242-5_12
- Riahi, S., & Riahi, A. (2021). Performance Evaluation of Random Access Methods for Wireless Systems. . . Vol., 7.
- Saha, A. (2017). *Data conversion techniques for next generation communications* [Doctoral Thesis]. University of Minnesota.
- Salih, A. H. A., Abdullah, S. H., & Ali, A. H. (2022). Radio Frequency Radiation Power Density measurements at Mobile Base Stations in Alam City. *Eurasian Journal of Engineering and Technology*, 11, 157–166.

- Sammons, J. (2012). Mobile Device Forensics. En *The Basics of Digital Forensics* (pp. 145–162). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-1-59749-661-2.00010-3>
- Sevilla Castillo, J. R. (2016). *Overview of UMTS network evolution through radio and transmission feature validation* [Universitat Politècnica de Catalunya]. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/87640>
- Shaik, N., & Malik, P. K. (2021). A comprehensive survey 5G wireless communication systems: Open issues, research challenges, channel estimation, multi carrier modulation and 5G applications. *Multimedia Tools and Applications*, 80(19), 28789–28827. <https://doi.org/10.1007/s11042-021-11128-z>
- Sivapriya, N., Vanteru, M. K., Vaigandla, K. K., & Balakrishna, G. (2023). Evaluation of PAPR, PSD, Spectral Efficiency, BER and SNR Performance of Multi-Carrier Modulation Schemes for 5G and Beyond. *International Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 10(11), 100–114. <https://doi.org/10.14445/23488379/IJEEE-V10I11P110>
- Sobot, R. (2021). Modulation. En R. Sobot, *Wireless Communication Electronics* (pp. 397–429). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-48630-3_15
- Solano-Escorcía, A., Sanjuanelo-Barraza, J., Cujavante-Hernandez, B., Cama-Pinto, A., & Cama-Pinto, D. (2022). A review on digital modulation in 4G LTE/4G LTE Advanced. *EasyChair Preprint*, 15.
- Sorseth, C. (2017). *Location Disclosure in LTE Networks by using IMSI Catcher* [Master Thesis]. Norwegian University of Science and Technology.
- Tadayoni, R., Henten, A., & Sørensen, J. (2018). Mobile communications – On standards, classifications and generations. *Telecommunications Policy*, 42(3), 253–262. <https://doi.org/10.1016/j.telpol.2018.01.001>

- Taid, R. (2021). *Mobile communications systems development: A practical introduction to system understanding, implementation and deployment*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119778714>
- Xenakis, C., Ntantogian, C., & Panos, O. (2016). (U)SimMonitor: A mobile application for security evaluation of cellular networks. *Computers & Security*, 60, 62–78. <https://doi.org/10.1016/j.cose.2016.03.005>
- Zhong, Z.-D., Ai, B., Zhu, G., Wu, H., Xiong, L., Wang, F.-G., Lei, L., Ding, J.-W., Guan, K., & He, R.-S. (2018). Key Issues for GSM-R and LTE-R. In Z.-D. Zhong, B. Ai, G. Zhu, H. Wu, L. Xiong, F.-G. Wang, L. Lei, J.-W. Ding, K. Guan, & R.-S. He (Eds.), *Dedicated Mobile Communications for High-speed Railway* (pp. 19–55). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-54860-8_2

Anexos

Modulación 4-QAM

```
% Script MATLAB para simulación de PAPR 4QAM y gráfico CCDF
clc; clear; close all;
% Parameters
N_FFT = [128, 256, 512, 1024]; % FFT sizes
numSymbols = 1e7; % Number of symbols
PAPR0_dB = 0:0.5:12; % PAPR range in dB
colors = ['k', 'b', 'r', 'm']; % Colors for plot
% Initialize figure
figure;
hold on;
grid on;
for idx = 1:length(N_FFT)
    fftSize = N_FFT(idx);
    % Generate random QPSK symbols
    symbols = (rand(numSymbols, 1) > 0.5)*2 - 1 + 1j*((rand(numSymbols,
1) > 0.5)*2 - 1);

    % Reshape and perform IFFT
    reshapedSymbols =
reshape(symbols(1:(floor(numSymbols/fftSize)*fftSize)), fftSize, []);
    timeDomainSignal = ifft(reshapedSymbols, fftSize);

    % Calculate PAPR
    power = abs(timeDomainSignal).^2;
    peakPower = max(power, [], 1);
    avgPower = mean(power, 1);
    PAPR = 10*log10(peakPower ./ avgPower);

    % Compute CCDF
    CCDF = zeros(size(PAPR0_dB));
    for k = 1:length(PAPR0_dB)
        CCDF(k) = mean(PAPR > PAPR0_dB(k));
    end
end
```

```

    % Plot CCDF
    semilogy(PAPR0_dB, CCDF, [colors(idx) '-s'], 'DisplayName', ['FFT '
num2str(fftSize)]);
end
% Format plot
xlabel('PAPR (dB)');
ylabel('Pr(PAPR > PAPR0)');
legend show;
title('CCDF de PAPR para diferentes tamaños de FFT');
set(gca, 'YScale', 'log');
ylim([1e-4 1]);
xlim([0 12]);
grid on;
hold off;

```

Modulación 16-QAM

```

% Script de MATLAB para simulación de PAPR 16QAM y gráfico CCDF
(ajustado para el nuevo gráfico)
clc; clear; close all;% Parameters
N_FFT = [128, 256, 512, 1024]; % FFT sizes
numSymbols = 1e7; % Number of symbols
PAPR0_dB = 0:0.5:12; % PAPR range in dB
colors = ['k', 'b', 'r', 'm']; % Colors for plot
markers = {'-s', '-o', '-^', '-p'}; % Markers for different curves
% Initialize figure
figure;
hold on;
grid on;
for idx = 1:length(N_FFT)
    fftSize = N_FFT(idx);
    % Generate random QPSK symbols
    symbols = (rand(numSymbols, 1) > 0.5)*2 - 1 + 1j*((rand(numSymbols,
1) > 0.5)*2 - 1);

    % Reshape and perform IFFT

```



```

    reshapedSymbols =
reshape(symbols(1:(floor(numSymbols/fftSize)*fftSize)), fftSize, []);
    timeDomainSignal = ifft(reshapedSymbols, fftSize);

    % Calculate PAPR
    power = abs(timeDomainSignal).^2;
    peakPower = max(power, [], 1);
    avgPower = mean(power, 1);
    PAPR = 10*log10(peakPower ./ avgPower);

    % Compute CCDF
    CCDF = zeros(size(PAPR0_dB));
    for k = 1:length(PAPR0_dB)
        CCDF(k) = mean(PAPR > PAPR0_dB(k));
    end

    % Plot CCDF with adjusted markers
    semilogy(PAPR0_dB, CCDF, [colors(idx), markers{idx}], 'LineWidth',
1.5, 'DisplayName', ['FFT ' num2str(fftSize)]);
end
% Format plot
xlabel('PAPR (dB)', 'FontWeight', 'bold');
ylabel('Pr(PAPR > PAPR0)', 'FontWeight', 'bold');
legend('show', 'Location', 'northeast');
title('CCDF de PAPR para diferentes tamaños de FFT', 'FontWeight',
'bold');
set(gca, 'YScale', 'log', 'FontSize', 12, 'LineWidth', 1.2);
ylim([1e-4 1]);
xlim([0 12]);
grid on;
hold off;

```

Modulación 64-QAM

```

% MATLAB Script for PAPR 64 QAM Simulation and CCDF Plot
clc;

```

```

clear;
close all;
% Parameters
N_FFT = [128, 256, 512, 1024]; % FFT sizes
numSymbols = 1e7; % Number of symbols
PAPR0_dB = 0:0.5:12; % PAPR range in dB
colors = ['k', 'b', 'r', 'm']; % Colors for plot
markers = {'-s', '-o', '-^', '-p'}; % Markers for different curves
% Initialize figure
figure;
hold on;
grid on;
legendEntries = cell(1, length(N_FFT)); % Initialize cell array for
legend entries
for idx = 1:length(N_FFT)
    fftSize = N_FFT(idx);
    % Generate random QPSK symbols
    symbols = (rand(numSymbols, 1) > 0.5)*2 - 1 + 1j*((rand(numSymbols,
1) > 0.5)*2 - 1);

    % Reshape and perform IFFT
    reshapedSymbols =
reshape(symbols(1:(floor(numSymbols/fftSize)*fftSize)), fftSize, []);
    timeDomainSignal = ifft(reshapedSymbols, fftSize);

    % Calculate PAPR
    power = abs(timeDomainSignal).^2;
    peakPower = max(power, [], 1);
    avgPower = mean(power, 1);
    PAPR = 10*log10(peakPower ./ avgPower);

    % Compute CCDF
    CCDF = zeros(size(PAPR0_dB));
    for k = 1:length(PAPR0_dB)
        CCDF(k) = mean(PAPR > PAPR0_dB(k));
    end
end

```

```

% Plot CCDF with adjusted markers and line styles
semilogy(PAPR0_dB, CCDF, [colors(idx), markers{idx}], ...
    'LineWidth', 1.5, 'MarkerSize', 6);

% Save legend entry
legendEntries{idx} = ['FFT ' num2str(fftSize)];
end
% Add legend
legend(legendEntries, 'Location', 'northeast', 'FontSize', 10);
% Format plot
xlabel('PAPR (dB)', 'FontWeight', 'bold');
ylabel('Pr(PAPR > PAPR0)', 'FontWeight', 'bold');
title('CCDF de PAPR para diferentes tamaños de FFT', 'FontWeight',
'bold');
set(gca, 'YScale', 'log', 'FontSize', 12, 'LineWidth', 1.2);
ylim([1e-4 1]);
xlim([0 12]);
grid on;
hold off;

```

Modulación 256-QAM

```

% MATLAB Script for PAPR 256 QAM
    Simulation and CCDF Plot (Legend Issue Fixed)
clc;
clear;
close all;
% Parameters
N_FFT = [128, 256, 512, 1024]; % FFT sizes
numSymbols = 1e7; % Number of symbols
PAPR0_dB = 0:0.5:12; % PAPR range in dB
colors = ['k', 'b', 'r', 'm']; % Colors for plot
markers = {'-s', '-o', '-^', '-p'}; % Markers for different curves
% Initialize figure
figure;

```

```

hold on;
grid on;
legendEntries = {}; % Initialize cell array for legend entries
for idx = 1:length(N_FFT)
    fftSize = N_FFT(idx);
    % Generate random QPSK symbols
    symbols = (rand(numSymbols, 1) > 0.5)*2 - 1 + 1j*((rand(numSymbols,
1) > 0.5)*2 - 1);

    % Reshape and perform IFFT
    reshapedSymbols =
reshape(symbols(1:(floor(numSymbols/fftSize)*fftSize)), fftSize, []);
    timeDomainSignal = ifft(reshapedSymbols, fftSize);

    % Calculate PAPR
    power = abs(timeDomainSignal).^2;
    peakPower = max(power, [], 1);
    avgPower = mean(power, 1);
    PAPR = 10*log10(peakPower ./ avgPower);

    % Compute CCDF
    CCDF = zeros(size(PAPR0_dB));
    for k = 1:length(PAPR0_dB)
        CCDF(k) = mean(PAPR > PAPR0_dB(k));
    end

    % Plot CCDF with adjusted markers and line styles
    semilogy(PAPR0_dB, CCDF, [colors(idx), markers{idx}], ...
        'LineWidth', 1.5, 'MarkerSize', 6);

    % Add current FFT size to legend entries
    legendEntries{end+1} = ['FFT ' num2str(fftSize)];
end
% Add legend
legend(legendEntries, 'Location', 'northeast', 'FontSize', 10);
% Format plot

```

```
xlabel('PAPR (dB)', 'FontWeight', 'bold');
ylabel('Pr(PAPR > PAPR0)', 'FontWeight', 'bold');
title('CCDF de PAPR para diferentes tamaños de FFT', 'FontWeight',
'bold');
set(gca, 'YScale', 'log', 'FontSize', 12, 'LineWidth', 1.2);
ylim([1e-4 1]);
xlim([0 12]);
grid on;
hold off;
```



Presidencia
de la República
del Ecuador



Plan Nacional
de Ciencia, Tecnología,
Innovación y Saberes



SENESCYT
Secretaría Nacional de Educación Superior,
Ciencia, Tecnología e Innovación


DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **Peñafile Tigrero, Washington Javier** con C.C: # 0913818001 autor del trabajo de titulación: Evaluación de las técnicas de modulación PSK y QAM en sistemas OFDM basados en redes móviles 5G, previo a la obtención del título de **Magister en Telecomunicaciones** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, 13 de marzo de 2025

f.  _____

Nombre: **Peñafile Tigrero, Washington Javier**

C.C: 0913818001



Presidencia
de la República
del Ecuador



Plan Nacional
de Ciencia, Tecnología,
Innovación y Saberes



SENESCYT
Secretaría Nacional de Educación Superior,
Ciencia, Tecnología e Innovación

REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN

TÍTULO Y SUBTÍTULO:	Evaluación de las técnicas de modulación PSK y QAM en sistemas OFDM basados en redes móviles 5G		
AUTOR(ES)	Peñañiel Tigrero, Washington Javier		
REVISOR(ES)/TUTOR(ES)	Ing. Zamora Cedeño, Nestor Armando (Revisor) Ing. Bohórquez Heras, Daniel Bayardo (Revisor) Ing. Peñañiel Olivo, Kety Jenny (Tutor)		
INSTITUCIÓN:	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
FACULTAD:	Sistema de Posgrado		
PROGRAMA:	Maestría en Telecomunicaciones		
TÍTULO OBTENIDO:	Magister en Telecomunicaciones		
FECHA DE PUBLICACIÓN:	13 de marzo de 2025	No. DE PÁGINAS:	77 p.
ÁREAS TEMÁTICAS:	Comunicaciones Inalámbricas, Simulación, Programación informática, Medios sociales.		
PALABRAS CLAVES/KEYWORDS:	5G, OFDM, PSK, QAM, PAPR, BER		
RESUMEN/ABSTRACT (150-250 palabras):			
<p>La evolución de las redes móviles ha impulsado el desarrollo de nuevas técnicas de modulación para mejorar la eficiencia espectral y la calidad de la transmisión. En este contexto, los esquemas de modulación PSK (Phase Shift Keying) y QAM (Quadrature Amplitude Modulation) han sido ampliamente adoptados en los sistemas OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) utilizados en redes móviles 5G. Esta investigación evalúa el rendimiento de PSK y QAM en un sistema OFDM bajo condiciones de canales de desvanecimiento Rician y Rayleigh, utilizando simulaciones en MATLAB. Se analizan métricas clave como la Relación Pico-Potencia Media (PAPR) y la Tasa de Error de Bits (BER) para determinar la técnica de modulación más eficiente en términos de robustez y eficiencia espectral. Los resultados indican que QAM proporciona una mayor eficiencia espectral en condiciones de alta relación señal-ruido (SNR), mientras que PSK ofrece mayor robustez en entornos con desvanecimiento severo. Este estudio aporta información relevante para la optimización de sistemas de comunicación en redes 5G, permitiendo mejorar la calidad del servicio y la asignación eficiente de los recursos espectrales.</p>			
ADJUNTO PDF:	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
CONTACTO CON AUTOR/ES:	Teléfono: +593996158391	E-mail: penafiel_ja@hotmail.com	
CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN (COORDINADOR DEL PROCESO UTE):	Nombre: Bohórquez Escobar Celso Bayardo		
	Teléfono: +593905147293		
	E-mail: celso.bohorquez@cu.ucsg.edu.ec		
SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA			
Nº. DE REGISTRO (en base a datos):			
Nº. DE CLASIFICACIÓN:			
DIRECCIÓN URL (tesis en la web):			