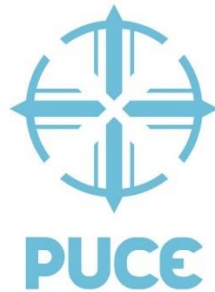


PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR



FACULTAD DE INGENIERÍA

MAESTRÍA EN REDES DE COMUNICACIÓN

TRABAJO DE TITULACIÓN

TEMA:

“Análisis de la eficiencia de U-OFDM y UF-OFDM”

Edison Xavier Bayas Moposita

Quito – 2020

AUTORÍA

Yo, Edison Xavier Bayas Moposita, portador de la cédula de ciudadanía No 0201976768, declaro bajo juramento que la presente investigación es de total responsabilidad del autor, y que se he respetado las diferentes fuentes de información realizando las citas correspondientes. Esta investigación no contiene plagio alguno y es resultado de un trabajo serio desarrollado en su totalidad por mi persona.

Edison Xavier Bayas Moposita

DEDICATORIA

Mis horas de dedicación, mis esfuerzos del día a día y que ello significa en ocasiones estar lejos, mis deseos de superación y mis más anhelados sueños que con perseverancia los persigo, se los dedico a mis princesitas: Emily y Michelle; y a ti esposa querida, Florcita, te agradezco y dedico este trabajo. A mi pequeña familia.

A ustedes, María y Manuel, mi querida madre y mi querido padre que me han animado a seguir, que con sus acertadas palabras me han llenado de esperanza y con quienes inicie esta maravillosa etapa, entre apuros e incertidumbre, finalmente y con orgullo les dedico otro logro más y quiero compartir con ustedes mi alegría.

AGRADECIMIENTO

Este trabajo no hubiera sido posible sin la gentil e incondicional enseñanza y ayuda de los distinguidos docentes de la PUCE, en especial a Juan Francisco Chafra; a mi querida familia que me ha inspirado a seguir a pesar de las dificultades; a todos los amigos de la PUCE que hicieron de ésta, una experiencia muy enriquecedora.

A todos ustedes, mi profundo y eterno agradecimiento.

ÍNDICE GENERAL

AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTO	IV
ÍNDICE GENERAL	V
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VII
ÍNDICE DE TABLAS.....	IX
1. Resumen y abstract.....	1
1.1. Resumen	1
1.2. Abstract	2
2. Introducción	3
3. Justificación	4
4. Antecedentes.....	6
5. Objetivos.....	7
5.1. Objetivo General.....	7
5.2. Objetivos Específicos	7
6. Desarrollo Caso de Estudio	8
6.1. Generalidades de las comunicaciones inalámbricas.....	9
6.1.1. Inconvenientes en el canal de radio.....	11
6.1.2. OFDM como solución a los problemas inalámbricos.....	17
6.1.3. Técnicas de filtrado y ventaneo usadas en la 5G NR.....	23
6.2. F-OFDM	24
6.2.1. Análisis de la operación de F-OFDM	25
6.2.2. Aplicaciones	31
6.2.3. Ventajas y desventajas.....	31
6.3. UF-OFDM.....	33
6.3.1. Análisis de la operación de UF-OFDM.....	34
6.3.2. Aplicaciones	40
6.3.3. Ventajas y desventajas.....	40
6.4. Comparación de F-OFDM y UF-OFDM.....	41
6.4.1. Modelo de simulación	41
6.4.2. PSD.....	44
6.4.3. EVM	45
6.4.4. BER.....	48

7. Conclusiones y Recomendaciones	50
8. Bibliografía.....	51
9. Anexos	55
9.1. Anexo 1, código MatLab	55
9.2. Anexo 2, entorno de simulación.....	58

ÍNDICE DE FIGURAS

Gráfico 1: Espectro de OFDM, UF-OFDM y F-OFDM.	4
Gráfico 2: Tendencias tecnológicas.	10
Gráfico 3: Efectos de las señales multi ruta.	12
Gráfico 4: Efecto del Delay Spread.	13
Gráfico 5: Efectos de la atenuación de canal selectivo.	14
Gráfico 6: Interferencia entre portadoras.	14
Gráfico 7: Generación de ICI.	15
Gráfico 8: Espectro disponible para el 5G.	16
Gráfico 9: Pulso rectangular y su transformada de Fourier.	18
Gráfico 10: Espectro de un sub-canal y arreglo de sub-canales.	19
Gráfico 11: Espectro OFDM.	19
Gráfico 12: Multi-portadora tradicional y OFDM.	20
Gráfico 13: Modulador y demodulador OFDM.	21
Gráfico 14: Representación del Prefijo Cíclico.	21
Gráfico 15: OFDM y OFDMA.	22
Gráfico 16: Línea de tiempo de las tecnologías de redes móviles.	24
Gráfico 17: Espectro F-OFDM.	25
Gráfico 18: Actores del Network Slicing.	26
Gráfico 19: Diagrama de bloques de F-OFDM.	27
Gráfico 20: esquema de filtros en F-OFDM.	27
Gráfico 21: PSD de OFDM y F-OFDM en varias ventanas.	28
Gráfico 22: Servicios acomodados en una señal F-OFDM.	28
Gráfico 23: PSD de OFDM.	29
Gráfico 24: PSD de F-OFDM.	30
Gráfico 25: BER para OFDM.	30
Gráfico 26: BER de F-OFDM.	31
Gráfico 27: Adaptabilidad de F-OFDM en el espectro.	32
Gráfico 28: Transmisor y receptor de ZP-OFDM.	33
Gráfico 29: Modulador ZP-OFDM.	34
Gráfico 30: Sistema UFMFC/UF-OFDM.	35
Gráfico 31: Distribución de sub-bandas en UFMFC.	36
Gráfico 32: Portadoras y sub-bandas de UFMFC.	37
Gráfico 33: Espectro de una subportadora en UFMFC.	37
Gráfico 34: Espectro de una señal UFMFC:	37
Gráfico 35: PSD de OFDM.	38
Gráfico 36: PSD de UFMFC/UF-OFDM.	38
Gráfico 37: BER de IDMA-OFDM versus OFDMA.	39
Gráfico 38: Transmisor y receptor de IDMA-OFDM.	40
Gráfico 39. PSD de F-OFDM.	44
Gráfico 40. PSD de UF-OFDM/UFMC.	44
Gráfico 41. PSD de OFDM.	45
Gráfico 42. EVM de F-OFDM con 256 QAM.	46
Gráfico 43. EVM de UF-OFDM/UFMC con 256 QAM.	46
Gráfico 44. EVM de F-OFDM con QPSK.	47

Gráfico 45. EVM de UF-OFDM/UFMC con QPSK.....47

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Numerología para las tramas de capa física 5G NR.....	43
Tabla 2. Valores de EVM a diferentes órdenes de modulación.	48
Tabla 3. BER para diferentes órdenes de modulación.	49

1. Resumen y abstract

1.1. Resumen

Durante los últimos años el desarrollo de las comunicaciones inalámbricas ha sido tan vertiginoso, lo que ha permitido la movilidad y la masificación de la tecnología.

Se han tenido que sortear grandes inconvenientes técnicos a fin de lograr que la comunicación inalámbrica, la red celular específicamente, nos provea altas tasas de transmisión capaces de permitir la interacción en tiempo real, por ejemplo.

Sin lugar a dudas, la interfaz aire ha tenido que ser rediseñada constantemente y su evolución no se detiene. Para la nueva tecnología de quinta generación, la interfaz aire 5G NR incorpora novedosas mejoras con la finalidad de cumplir con los requisitos de esta generación.

Entre los principales problemas a solventar están: la densidad de usuarios, los tiempos de respuesta, el espectro utilizado, entre otros.

Dado que las generaciones de comunicaciones móviles están en constante desarrollo, se están probando varias opciones que inclusive, servirán a futuro.

Para el presente estudio se consideran a F-OFDM y UF-OFDM, dentro de un amplio grupo de tecnologías para este propósito, la mayoría de ellas aun en investigación.

El método comparativo es utilizado, dado que las tecnologías en cuestión ya están desarrolladas y existe información de cada una de ellas que puede ser contrastada; a la vez, se plantea un modelo de simulación para evidenciar el comportamiento de las dos tecnologías en estudio. En este último, se considera la misma entrada binaria para cada tecnología y se las evalúa en función de su tasa de errores, la magnitud del vector de errores y su densidad de potencia espectral, claro, considerando el orden de modulación.

Sin embargo, existen varios parámetros que pueden ser considerados adicionalmente con la finalidad de obtener resultados acordes a la tecnología disponible en la actualidad, por ejemplo: considerar la codificación polar, incluir las técnicas multi antena, validar el comportamiento sobre portadoras de ondas milimétricas, entre otras. Cada una de estas técnicas requiere una amplia discusión y, por tanto, se deja que la combinación con F-OFDM/UF-OFDM sea considerada en estudios futuros.

Evidentemente, el medio inalámbrico hace que la tecnología nos de comodidad, pero, su desarrollo conlleva grandes retos para aprovechar el recurso de la mejor manera posible.

1.2. Abstract

In recent years, the development of wireless communications has been so rapid, which has allowed mobility and the spread of technology.

Great technical issues have had to be overcome in order to ensure that wireless communication, specifically the cellular network, that provides high data transmission rates to allow real time interactions, for example.

Without a doubt, the air interface has had to be constantly enhanced and its evolution does not stop. For the new fifth generation technology, the 5G NR air interface incorporates novel enhancements to meet the requirements of this generation.

Many of the problems that have to be solved are: user density, response time, the spectral efficiency, among others.

As generations of mobile communications are constantly developing, several options are being tested that will even serve to the future.

In the present analysis F-OFDM and UF-OFDM are considered, within a wide group of technologies, most of them are still under research..

The comparative method is used, since the technologies in question are already developed and there is information on each of them that can be verified; At the same time, a simulation model is proposed to demonstrate the behavior of the two technologies under study. In the latter, the same binary input is considered for each technology and they are evaluated based on their error rate, the magnitude of the error vector and their spectral power density, of course, considering the modulation order.

However, there are several additional parameters that can be considered in order to obtain results according to the current technology available. For example: consider polar coding, include multi-antenna techniques, validate behavior on millimeter wave carriers, among others. Each of these techniques requires an extensive discussion and therefore the combination with F-OFDM / UF-OFDM is left to be considered in future studies.

Obviously, the wireless medium makes technology comfortable for us, but its development entails great challenges to take advantage of the resource in the best possible way.

2. Introducción

El presente estudio pretende analizar las mejoras del esquema de modulación OFDM, mismo que es ampliamente utilizado en los sistemas de comunicaciones de alta velocidad.

OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), en los últimos años ha tomado mucha relevancia para el desarrollo de la nueva interfaz radio para redes móviles de quinta generación, 5G. Su principal característica que es el arreglo ortogonal de las sub portadoras que componen la señal, ha permitido que su aplicación sea difundida en varias aplicaciones, permitiendo obtener resultados favorables de los sistemas de comunicaciones modernos.

Si bien en este sentido existen varias propuestas que están siendo mundialmente analizadas y probablemente, desarrolladas, el presente estudio se limita a las siguientes: F-OFDM (Filtered OFDM) y UF-OFDM (Universal Filtered OFDM); estas son consideradas como mejoras de OFDM respecto a las frecuencias de corte. Es decir, que actúan como filtros optimizados sobre una señal OFDM.

Se pretende encontrar las ventajas y desventajas de cada una de ellas, apuntando a determinar cuan acertada ha sido la decisión de considerarlas en el despliegue de las redes 5G.

Para ello, en la sección 6.1 se estudia las principales características del canal de radio y las técnicas que permiten su explotación para luego, en la sección 6.2 y 6.3 exponer el funcionamiento, las aplicaciones y ventajas de F-OFDM y UF-OFDM, respectivamente. Finalmente, en la sección 6.4, se realiza la comparación de estas dos tecnologías.

3. Justificación

Dado a que la gran mayoría de dispositivos son diseñados con un enfoque de movilidad, las redes móviles requieren adecuar su infraestructura y tecnología de forma que se soporte la demanda antes mencionada, así como también se haga uso eficiente de los recursos.

Y precisamente, es en la búsqueda de esta eficiencia en donde las técnicas de filtrado, y otras, de los diferentes esquemas de transmisión cobran suma importancia. Así, una de las formas de optimizar el uso del espectro es minimizar la presencia de modulación en señales colaterales de una señal en el dominio de la frecuencia.

En efecto, F-OFDM y UF-OFDM son algunas técnicas que buscan filtrar de mejor manera una señal OFDM para lograr, en lo posible, tener una modulación similar a la teórica: con un impulso en la frecuencia central, con su ancho de banda correspondiente, y casi sin presencia de lóbulos laterales, como se puede apreciar en el Grafico 1.

De ser así, entonces estos espacios podrían ser usados por otras transmisiones, mejorando significativamente el uso de los recursos.

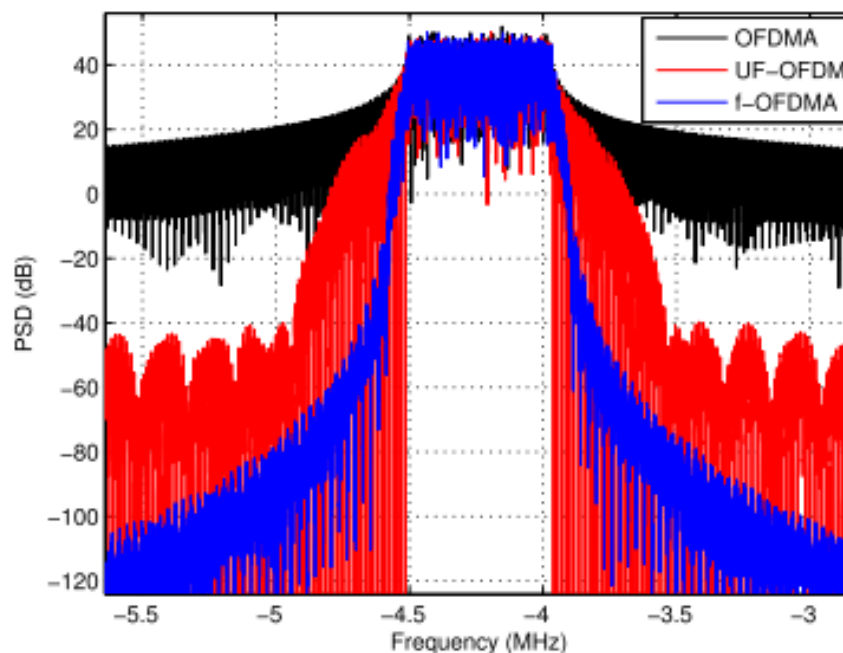


Gráfico 1: Espectro de OFDM, UF-OFDM y F-OFDM.
Fuente: (Abdoli, Jia, & Ma, 2015)

Por tanto, se considera importante el estudio de estas dos técnicas que en la actualidad se están empleando para los sistemas 5G NR¹ ya que, por el momento, no se cuentan con análisis comparativos entre F-OFDM y UF-OFDM exclusivamente y más bien, estas han sido desarrolladas de forma paralela.

El presente análisis no se limita a la actual tecnología en auge, 5G, sino más bien se puede extender para cualquier sistema que use OFDM.

¹ 5G NR, 5° Generation New Radio

4. Antecedentes

Desde hace algunos años se ha venido trabajando en reestructurar la infraestructura de redes de datos móviles en busca siempre de mejorar las velocidades de transmisión y reducir la latencia. Sin embargo, la prometedora tecnología 5G involucra mucha más que velocidad y mínima latencia, tal que hace necesaria la construcción de un esquema C-RAN², que densifique las comunicaciones móviles y cubra las necesidades de los usuarios, sean estas personas o cosas (Huawei Technologies Co., Ltd., 2018).

A lo largo de los últimos años, se ha dado un significativo desarrollo de los sistemas ortogonales con miras a poder utilizar mejor el espectro asignado. Dada la exitosa experiencia con OFDM en varias tecnologías, hoy en día comunes para nosotros, casi de forma unánime se ha decidido también usarla para el despliegue de la red de ultra alta velocidad de quinta generación (5G) pero, con mejoras que permiten optimizar mucho más el uso de recursos y también, que tengan robustez a cualquier tipo de interferencia u obstáculo en su trayectoria.

Como lo menciona (Goztepe & KarabulutKurt, 2018), UF-OFDM emerge siendo un fuerte candidato ante CP-OFDM³ (usado en 4G) para sobrellevar los problemas de grandes lóbulos laterales (dominio de la frecuencia), problemas de sincronización y de eficiencia espectral.

También ya se han realizado estudios con F-OFDM para modular directamente sobre pulsos de luz, una señal OFDM, ajustándose a los requerimientos de arquitectura del 5G. (Yao , y otros, 2019). Justamente la nueva arquitectura de redes móviles contempla un escenario virtual y desarrollado en base al cloud y en tal virtud las señales deberán viajar moduladas; las propiedades de la luz y la fibra óptica efectivamente permiten la transmisión de señales directamente moduladas.

La tendencia a la movilidad crece cada día y la proliferación de servicios basados en la nube, el incremento del poder computacional y la asequibilidad han hecho que estas tecnologías de ultra alta velocidad sean cada vez más democratizadas y se prevé que aquellas sociedades que adopten y hagan un uso racional de esta nueva etapa industrial, tengan un crecimiento significativo en sus economías.

² C-RAN, Cloud-Radio Access Network
³ CP-OFDM, Cyclic Prefix OFDM

5. Objetivos

5.1. Objetivo General

Analizar la eficiencia de F-OFDM y UF-OFDM.

5.2. Objetivos Específicos

1. Investigar las técnicas de filtrado que han sido propuestas para la 5G NR.
2. Analizar la operación de F-OFDM y UF-OFDM.
3. Extraer las ventajas y desventajas de F-OFDM y UF-OFDM.
4. Exponer la comparación de entre F-OFDM y UF-OFDM.
5. Crear un modelo de simulación para evaluar el comportamiento de F-OFDM y UF-OFDM.

6. Desarrollo Caso de Estudio

El presente estudio, acerca del F-OFDM⁴ y UF-OFDM⁵, pretende exponer la importancia de tener técnicas más precisas de filtrado de señales y su gran importancia en el diseño de sistemas de comunicaciones de gran rendimiento. Si bien, son varios los criterios que pueden influenciar en el rendimiento de un sistema de comunicaciones, justamente la precisión de las frecuencias de corte de los diferentes filtros que componen el sistema, son parte importante si se considera que la optimización del espectro y, por consiguiente, el incremento de la densidad de tráfico que los mismos pueden soportar.

Así, se pretende hacer entonces un estudio pormenorizado de las principales técnicas de modulación, sus ventajas y desventajas, y particularmente se estudiará a OFDM⁶ por ser considerado, a la fecha, el de mejor eficiencia; evidentemente, se analizará la razón de usar OFDM.

Posteriormente, se analizarán las formas de poder optimizar a OFDM y entre ellas, el recorte de los componentes frecuenciales propios del trabajo en el dominio de la frecuencia; así, se introduce en el estudio de dos casos particulares: F-OFDM y UF-OFDM.

Ciertamente, con el actual OFDM se puede optimizar el uso de ancho de banda, pero no cubre por si solo los requerimientos de 5G NR⁷ (IET Digital Library, 2018) que, en esencia, trata de elaborar una nueva forma de onda (Hazareena & Mustafa, 2018) capaz de poder transportarse con la misma eficiencia por cualquier medio de transmisión. (Ahmed, Schaich, & Wild, 2018).

En esencia, la evolución del poder computacional que se ha experimentado hoy en día hace que las funciones de red puedan ser virtualizadas, es el caso de NFV⁸ y sus funciones de red también mediante SDN⁹ (Yousaf, Bredel, & Schaller, 2018). Siendo así, casi el total de las operaciones ejecutadas sobre una señal son ejecutadas en elementos funcionales de software (centralizadamente) y requiere que una única transformación (trascendental) de señal y es justamente la interfaz aire. Las nuevas arquitecturas de red inalámbrica, como el 5G NR contemplan un escenario totalmente virtual para la red de acceso radio y por ello la necesidad de disponer de nuevas formas de onda, más eficientes (Mondal, Sergeev, Sengupta, & Davydov, 2018).

4 F-OFDM, Filtered- Orthogonal Frequency Division Multiplexing

5 UF-OFDM, Universal Filtered-Orthogonal Frequency Division Multiplexing

6 OFDM, Orthogonal Frequency Division Multiplexing

7 5G NR, 5G New Radio

8 NFV, Network Function Virtualization

9 SDN, Software Defined Networking

Posteriormente, se expondrá la aplicabilidad de estas técnicas y su interés para su uso en las nuevas tecnologías de banda ancha, particularmente en el 5G; el uso de arreglos multi antena (MIMO¹⁰) se ha vuelto común en los últimos años para mejorar el LTE¹¹ inclusive, pero para que la solución sea completa es necesario complementarla con los denominados Windowing y Filtering, de acuerdo a (Ullah Shah, y otros, 2018); de entre las nuevas formas de onda para el el 5G NR, WOLA¹² es una técnica de windowing (ventaneo) y tanto F-OFDM como UF-OFDM son técnicas de filtering (filtrado) de sub-bandas.

En definitiva, el uso de estas técnicas de filtrado (filtering) nos permiten optimizar el uso del espectro e incrementar las tasas de transferencia así como también, posibilita que las señales OFDM puedan ser transportadas mediante fibra óptica desde los RRH¹³ hasta los RC¹⁴, como si de una señal en banda base se tratara pero con significativa reducción de tiempos producto de las conversiones eléctrico óptico que en un sistema tradicional ocurren (Chanclou, y otros, 2018).

El análisis del presente caso comprende la recolección de información para poder establecer las diferencias conceptuales y de resultados objetivos a fin de poder establecer una clara y comprensible diferencia de las dos técnicas de filtrado mencionadas.

Si bien se conoce que ya hay algunos prototipos funcionales de 5G, no hay aun a la fecha un estándar formal expedido y, por tanto, es un tema de discusión dentro de las telecomunicaciones de última generación.

6.1. Generalidades de las comunicaciones inalámbricas

Las comunicaciones inalámbricas se han convertido al día de hoy, en el pilar fundamental del desarrollo tecnológico de la sociedad moderna e incluso, llegando al punto de competir y disputar el dominio de ciertas tecnologías. Esto hace suponer el enorme impacto económico que el desarrollo de los sistemas inalámbricos conlleva.

Sin embargo, las interfaces de radio han experimentado un exhaustivo pero rápido desarrollo técnico que ha permitido pasar desde una rústica transmisión analógica, a sofisticados sistemas digitales que permiten altas tasas de transmisión y, usando eficientemente el espectro, sobre todo.

En efecto, las preocupaciones que han impulsado la evolución técnica han sido el incremento de consumo de información por parte del usuario y el incremento en la densidad

¹⁰ MIMO, Multiple-input Multiple-output

¹¹ LTE, Long Term Evolution

¹² WOLA, Windowed Overlap-add

¹³ RRH, Remote Radio Head

¹⁴ RC, Radio Controller

de terminales móviles, todo considerando un espectro bastante limitado en cuanto a cantidad.

Ahora mismo, “la tecnología inalámbrica juega un papel importante en las comunicaciones de hoy en día” (Gartner, 2019) y se han identificado varias tecnologías inalámbricas que marcaron posiblemente una revolución tecnológica basada en la conectividad y particularmente, en la movilidad. Muchas de las tendencias tecnológicas identificadas se apuntalan en la versatilidad de las redes inalámbricas y el desarrollo de los algoritmos computacionales; por supuesto, a esto se añade el incremento del poder de procesamiento. Se puede apreciar esto en el Grafico 2.

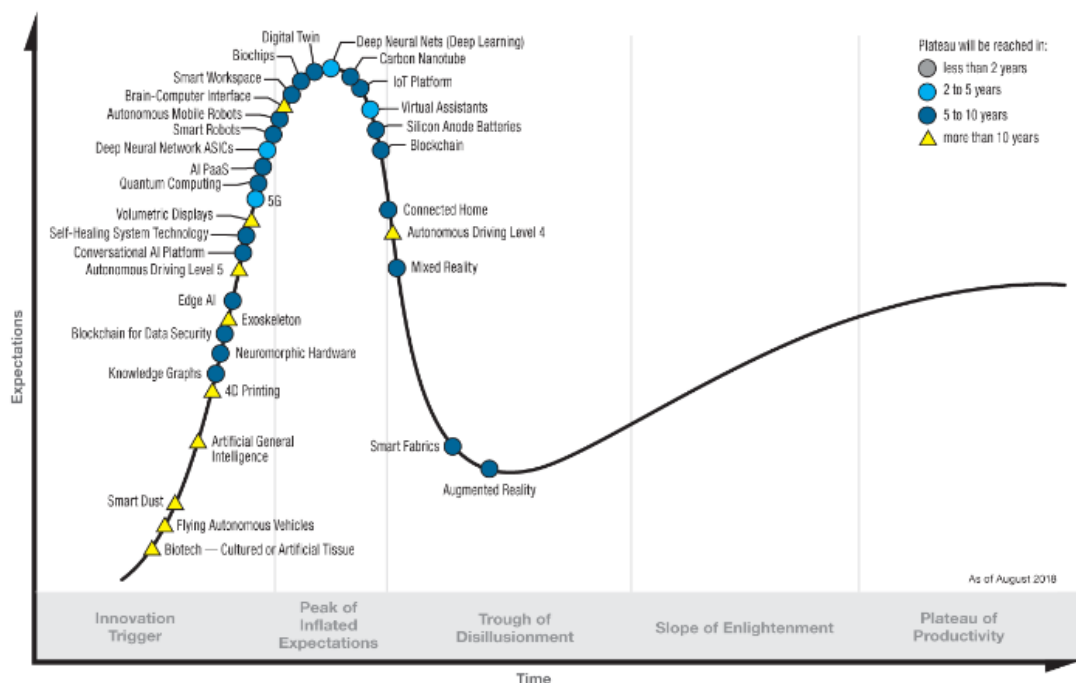


Gráfico 2: Tendencias tecnológicas.
Fuente: (GARTNER, 2018)

Si bien, el Wi-Fi¹⁵ y la red celular (móvil) son las más conocidas por el común de las personas dentro del contexto de acceso a internet, existe una variedad más amplia de redes inalámbricas que intercambian datos, como es lógico, cada una de ellas con sus diferentes ventajas y desventajas, pero adaptados para una actividad en particular.

El medio inalámbrico, que es muy susceptible a las condiciones del entorno e interferencias electromagnéticas, es bastante complicado de tratar y requiere ingeniosos artificios a fin

¹⁵ Wi-Fi, Wireless Fidelity

de poder aprovecharlo. Sin embargo, cualquier esfuerzo en su estudio resulta justificado dada su enorme ventaja para proveer al usuario la tan ansiada movilidad.

Los últimos años se han dado vertiginosos avances en el desarrollo de las redes de telefonía móvil, hasta el punto de hablar hoy en día en la necesidad de redes 6G que soporten algunos Tbit/s (Giordani, Polese, Mezzavilla, Rangan, & Zorzi, 2019).

Sin lugar a dudas, la comprensión del medio inalámbrico y su aprovechamiento han sido fundamentales para alcanzar estas capacidades y finalmente, proporcionar la experiencia tecnológica de hoy en día.

Ha sido necesario desarrollar desde técnicas de codificación de los bits generados por el usuario, hasta complejos esquemas de modulación resistentes a las muy cambiantes condiciones del medio inalámbrico.

Precisamente, bastante énfasis se ha puesto en el tema de la modulación y hoy en día casi todas las transmisiones son digitales y capaces de transportar varios bits por cada símbolo que, acompañados de un adecuado acceso al medio, hacen de estos sistemas bastante robustos y de alta densidad de tráfico, ideales para las cada vez más demandadas redes de ultra banda ancha.

Una vez accedido al medio con la información a transmitir, es necesario hacer un uso eficiente del mismo y es aquí, en donde surgen varias e ingeniosas alternativas que hacen más, con menos recursos; sin duda, el desarrollo de OFDM ha significado una evolución en el campo de la transmisión inalámbrica.

Sin embargo, los últimos años han sido testigos de la masificación de los dispositivos móviles y como consecuencia, el sustancial incremento de la conectividad.

Así OFDM, a pesar de su extraordinario desempeño también ha ido mostrando debilidades, y la genialidad del ser humano se ha hecho presente para proponer alternativas a fin de mejorar su eficiencia.

Acerca de OFDM y algunas de estas mejoras en el desempeño se tratará en el presente estudio.

6.1.1. Inconvenientes en el canal de radio

Hablando exclusivamente de la transmisión en un medio inalámbrico, aparecen problemas únicos relacionados a este medio.

A continuación, se exponen algunos de los más comunes en las redes móviles 4G, consideradas de mayor difusión comercial al día de hoy.

a. Multipath fading

El desvanecimiento multi ruta (*Multipath Fading*) es un fenómeno que ocurre debido a que las señales de radio siguen diferentes trayectorias hasta llegar a su destino, obedeciendo los principios físicos como la reflexión y difracción.

Como consecuencia de este fenómeno, las señales llegarán al receptor en diferentes tiempos por tanto la señal resultante diferirá de aquella que fue generada en el emisor. Es decir, la señal se desvanece hasta llegar al receptor como consecuencia de los obstáculos que estas señales deben sortear. Una apreciación de este concepto se puede apreciar en el Gráfico 3.

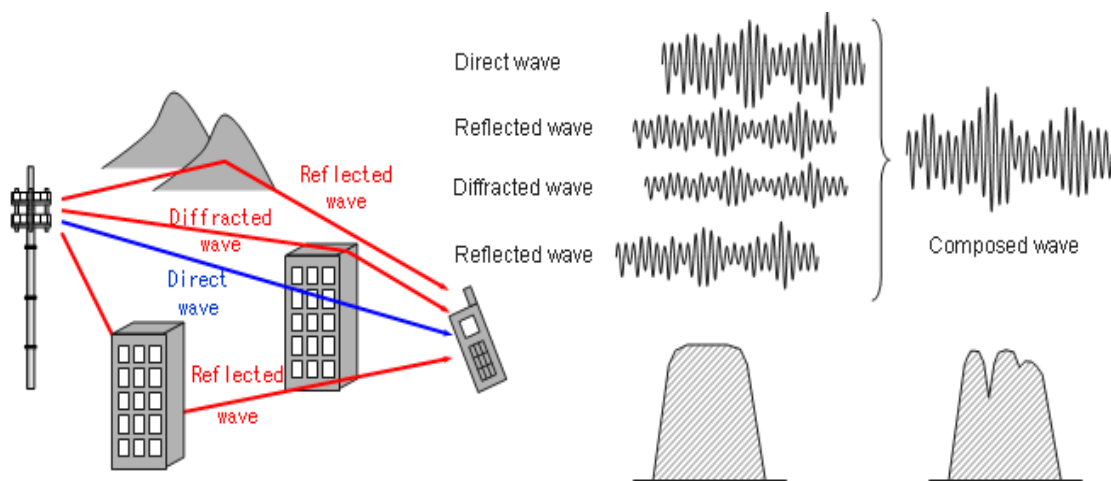


Gráfico 3: Efectos de las señales multi ruta.
Fuente: (Sharetechnote.com, 2016)

El desvanecimiento multi ruta es el principal fenómeno a afrontar en las comunicaciones inalámbricas, aunque en algunos casos ese comportamiento puede ser aprovechado.

b. Delay spread

La extensión del retardo (*Delay Spread*) es una consecuencia del fenómeno multi ruta y trata de medir el tiempo comprendido entre el arribo del primer componente de una señal y la recepción de la última. Entiéndase que el primer componente será aquel que sigue la línea de vista entre el emisor y receptor. Es decir, se genera una especie de eco y puede tener una extensión de algunos micro segundos. Ver el Gráfico 4.

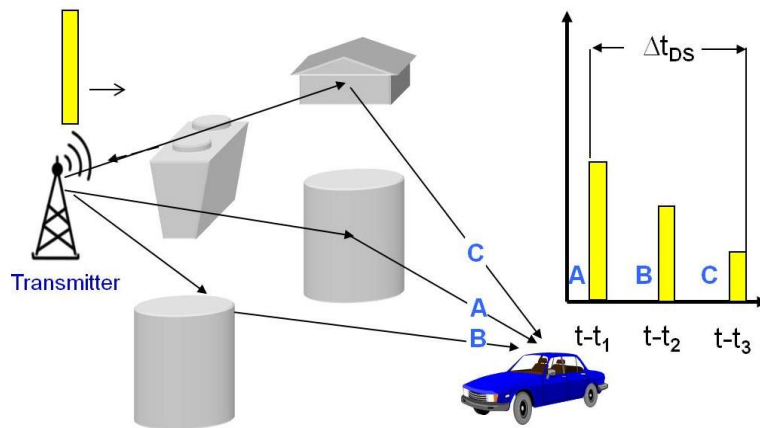


Gráfico 4: Efecto del Delay Spread.
Fuente: (windows.net, 2015)

Este parámetro muy bien puede ser usado para poder caracterizar a un canal inalámbrico. Es muy importante considerar que las condiciones de transmisión varían en función de la frecuencia de transmisión y si se considera que dentro del esquema OFDM existen varias subportadoras separadas en frecuencia, conocer el valor de extensión de retardo es sumamente importante a fin de diseñar sistemas adaptivos que permitan evitar una excesiva atenuación en alguna sub portadora (Li, Jing, Li, & Murch, 2018).

Finalmente, esta extensión de retardo incide fuertemente en el comportamiento de la ISI¹⁶.

c. Frequency selective fading

La atenuación en las diferentes bandas de frecuencia no es igual y, es más se puede decir que un canal de comunicaciones actúa como un filtro (pasa banda generalmente). Por ende, es necesario tomar en cuenta esta consideración ya que limita la capacidad de los medios de transmisión y podría afectar a la calidad de las comunicaciones. Estos efectos pueden ser visualizados en el Gráfico 5.

Tal como lo menciona (SPIRENT, 2018), el problema se atenúa con los multi-trayectos que de forma natural se forman con las señales de radio, pues esto contribuye con el cambio de fases en función de la distancia, además de la creación de ecos en la señal recibida.

Para ello, se pueden utilizar ecualizadores de frecuencia a fin de minimizar los efectos de la atenuación selectiva.

¹⁶ ISI, Inter Symbol Interference

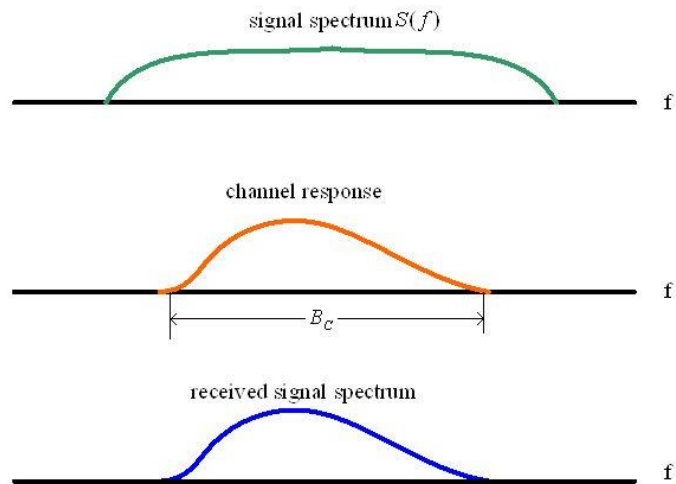


Gráfico 5: Efectos de la atenuación de canal selectivo.
Fuente: (Nash, 2015)

d. Inter channel interference

Otro de los problemas que se generan a partir de las señales multi ruta es la interferencia entre portadoras.

Como se detalla en (RF Wireless, 2012), para que OFDM función se requiere que sus sub portadoras sean ortogonales entre sí y sin embargo esto puede no darse y en estos casos, estas sub portadoras se sobreponen entre sí y dependiendo de la afectación entre el vecindario de frecuencias, inclusive se puede destruir la señal de interés. Así se puede apreciar en el Gráfico 6.

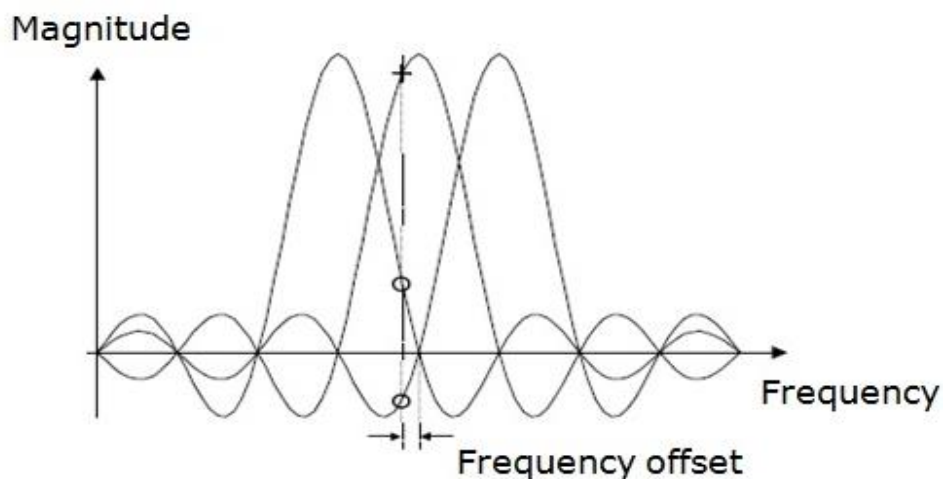


Gráfico 6: Interferencia entre portadoras.
Fuente: (RF Wireless, 2012)

Así mismo, si un símbolo llega con retraso al receptor, probablemente otra señal ya está en trámite y entonces habrá una porción afectada; éste fenómeno se conoce interferencia inter símbolos, ISI. Este problema se lo ha solucionado agregando información redundante; sin embargo, éste ha ocasionado la disminución en la eficiencia de transferencia de información; el desarrollo computacional también ha contribuido al proporcionar sistemas más precisos en cuanto a su sincronización.

Los inconvenientes inalámbricos expuestos, y otros, pueden combinarse para producir alteraciones de las señales de comunicaciones o, derivarse de algún otro fenómeno ya conocido. Así, por ejemplo, el fenómeno de ICI¹⁷ puede deducirse de las señales multi ruta estudiadas previamente. Esto se puede apreciar en el Gráfico 7.

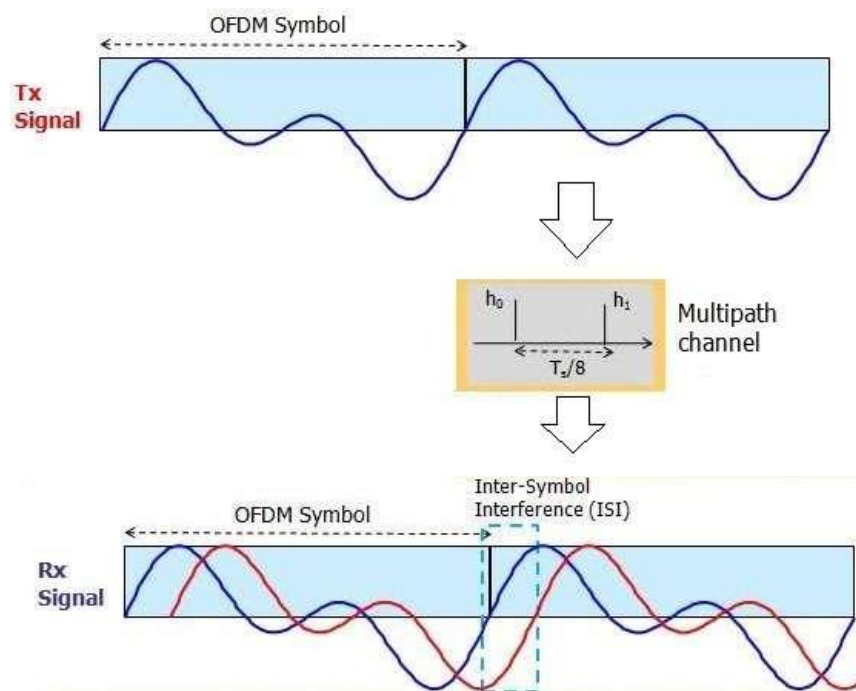


Gráfico 7: Generación de ICI.
Fuente: (RF Wireless, 2012)

e. Escases en el espectro

Lo escaso del espectro es sin lugar a dudas el principal problema que ha surgido a partir de la proliferación de redes inalámbricas. Particularmente, en los últimos años se ha visto una congestión en el espacio no licenciado; sin embargo, este inconveniente también ha sido evidente en las bandas con licencia y se ha dado cabida a un gran reto tecnológico: la optimización del consumo de ancho de banda.

¹⁷ ICI, Inter Channel Interference

Con la llegada de las nuevas tecnologías y el desarrollo computacional, se hace posible la utilización de frecuencias de operación más altas que permiten incrementar significativamente la capacidad de transmisión, en un escenario de demanda creciente. Sin lugar a dudas, estas regiones espectrales al día de hoy son poco utilizadas, en parte, por la enorme complejidad para operar en ellas.

Por tanto, el siguiente nivel de las redes inalámbricas es evidente: moverse a frecuencias de operación altas o, lo que comúnmente se conoce como ondas milimétricas. Con esto se logrará dar paso a redes de ultra alta velocidad a la vez que descongestionan ciertas bandas en donde existe al momento una acumulación de servicios coexistentes.

La ocupación eficiente de un espectro escaso está dentro de las consideraciones de los nuevos estándares como el 5G por ejemplo que, entre otras cosas busca alcanzar una red flexible y ágil, tal que se puedan ofrecer servicios personalizados acorde a las necesidades de una amplia variedad de usuarios y tipos de conexión (GSMA, 2019).

Teóricamente el rango de operación para el 5G se extiende hasta los 100 GHz (ver Gráfico 8), y generalmente se habla de dos conceptos (RF Page, 2018):

- Banda Sub-6GHz
- Ondas milimétricas (mayor a 6GHz)

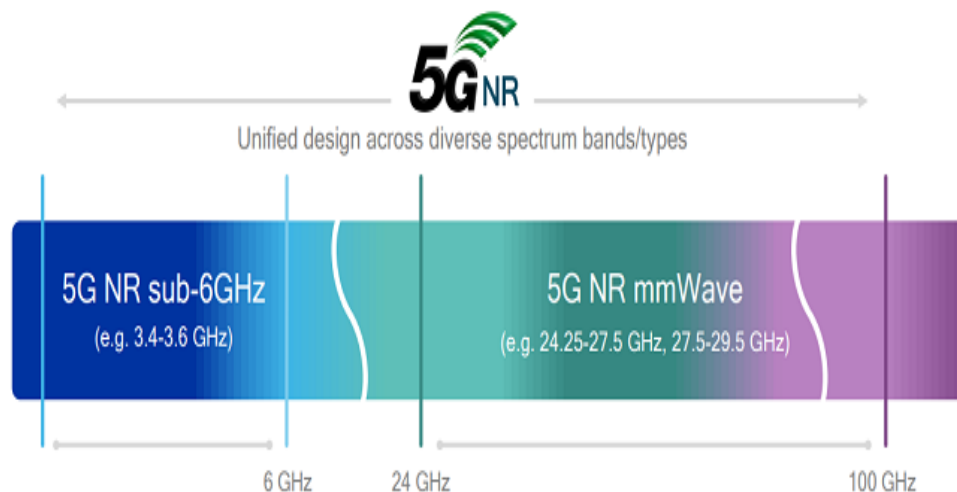


Gráfico 8: Espectro disponible para el 5G.
Fuente: (RF Page, 2018)

Aparte de las dificultades expuestas, también se requiere considerar 3 puntos que casi por consenso se ha requerido para una onda de 5G, pero sin limitarse exclusivamente a ellos (Zhang, Jia, Chen, Ma, & Qiu, 2015a):

- Servicios a medida para diferentes necesidades
- Reducidas emisiones fuera de banda (OOBE¹⁸)
- Extra tolerancia a las desalineaciones de frecuencia y tiempo.

Son en esencia estos tres puntos los que son sino difíciles, imposibles de superar con los esquemas OFDM tradicionales. Es pertinente considerar que OFDM es considerado el más eficiente esquema de modulación y gracias a ello ha ganado gran popularidad en el campo de las comunicaciones.

En un esquema de modulación OFDM, alcanzar la ortogonalidad de las subportadoras representa un consumo de alrededor del 10% (Zhang et al., 2015a) debido a las bandas de guarda, necesarias para evitar la interferencia co-canal. Precisamente, “la clave para la eficiencia en el ancho de banda es la ortogonalidad en las portadoras” (Suárez, 2001).

6.1.2. OFDM como solución a los problemas inalámbricos

Hasta antes de la masificación del internet y la proliferación de tecnologías inalámbricas, OFDM fue considerado como la tecnología por excelencia para el transporte de información.

Incluso, al día de hoy, para los sistemas que no exigen gran rendimiento este esquema sigue siendo el motor principal de las comunicaciones.

OFDM logra superar gran parte de los problemas inherentes a los sistemas inalámbricos y además permite optimizar el ancho de banda gracias a que emplea ortogonalidad de las subportadoras de banda estrecha contenidas dentro del ancho de banda y se admite un ligero traslape entre bandas laterales.

Esto, en esencia, es un gran avance respecto a sistemas anteriores.

En principio, las señales OFDM se fundamentan en el análisis en frecuencia de las señales mediante la transformada de Fourier.

Este a su vez trata de descomponer a una señal cualquiera en sus componentes trigonométricas esenciales.

Una señal de rectangular en el dominio temporal, tiene como su equivalente a una señal Sinc en el dominio de la frecuencia (Ver Gráfico 9); esto representa el espectro de la señal.

¹⁸ OOBE, Out-Of-Band-Emission

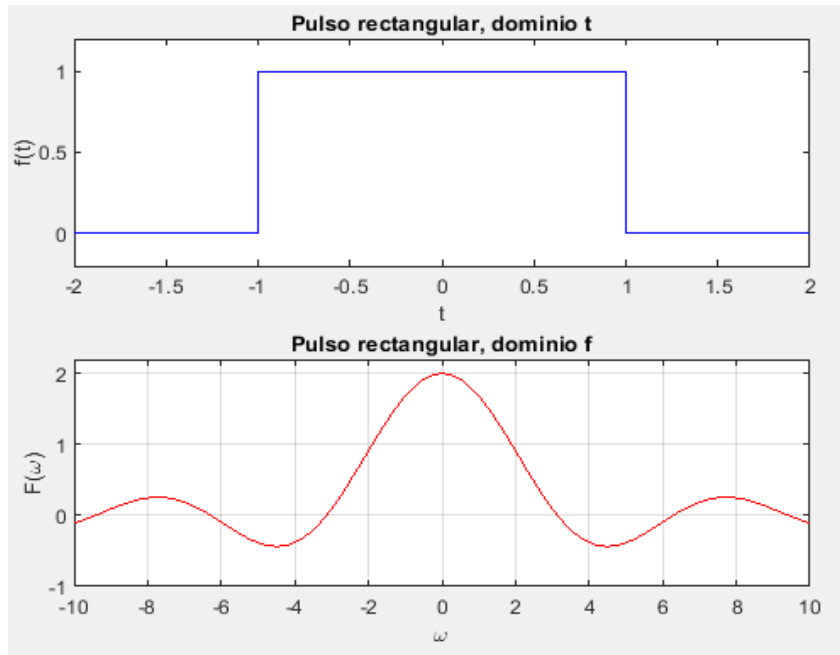


Gráfico 9: Pulso rectangular y su transformada de Fourier.
Fuente: autoría propia.

En el Gráfico 9 se puede visualizar que el espectro tiene un máximo y este corresponde a la frecuencia fundamental de la señal. En aplicaciones prácticas, este máximo corresponderá a la frecuencia de operación de una señal de comunicaciones.

Esta señal $F(\omega)$ prácticamente es una portadora de información, representada en el dominio de la frecuencia y para que la comunicación sea efectiva, es necesario que ésta no tenga interferencias, al menos en la zona en donde se concentra su máximo de potencia. Sin embargo, como se puede observar en el Gráfico 8, al impulso principal le acompañan impulsos de menor amplitud que se propagan, en teoría, hasta el infinito. Estos no son utilizados para transportar información y son producto de la naturaleza de la señal; es decir, la superposición de estas zonas con otras señales no degradará la calidad de la comunicación.

OFDM aprovecha este principio y trata de configurar un arreglo de portadoras, señales Sinc en el dominio de la frecuencia, de forma tal que los máximos de potencia y en esencia lo que verdaderamente importa de esas señales, no se vean afectados y por tanto la transmisión de información sea exitosa. Una representación didáctica se expone en el Gráfico 10.

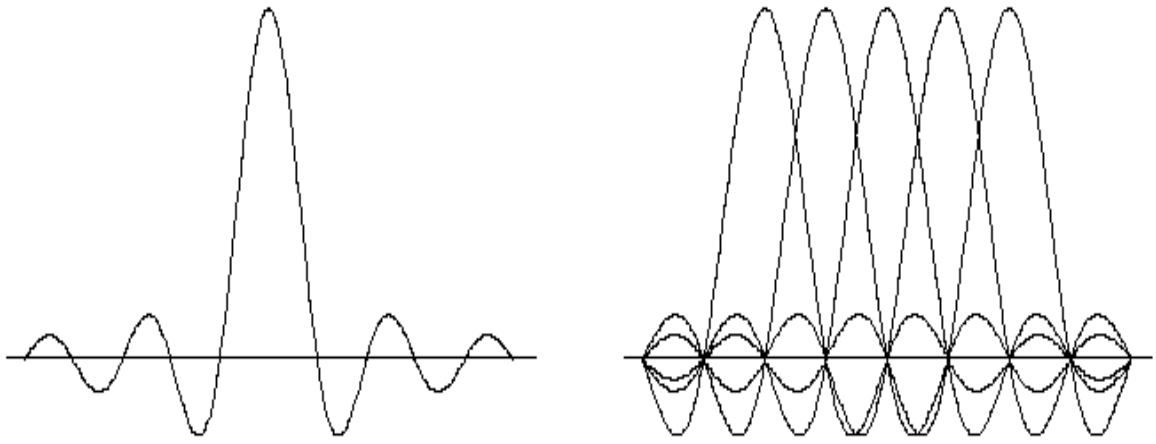


Gráfico 10: Espectro de un sub-canal y arreglo de sub-canales.
Fuente (Wireless Communication, 1999)

Es decir, OFDM trata de alcanzar la ortogonalidad de sus sub-canales (llamados también subportadoras) para evitar la interferencia y lograr la comunicación.

En una señal OFDM se agregan cientos o más sub-canales, cada uno de ellos transmitiendo una porción de la información generada en la fuente. Es común ver el espectro total y no el de cada sub-canal, como se puede apreciar el Grafico 11.

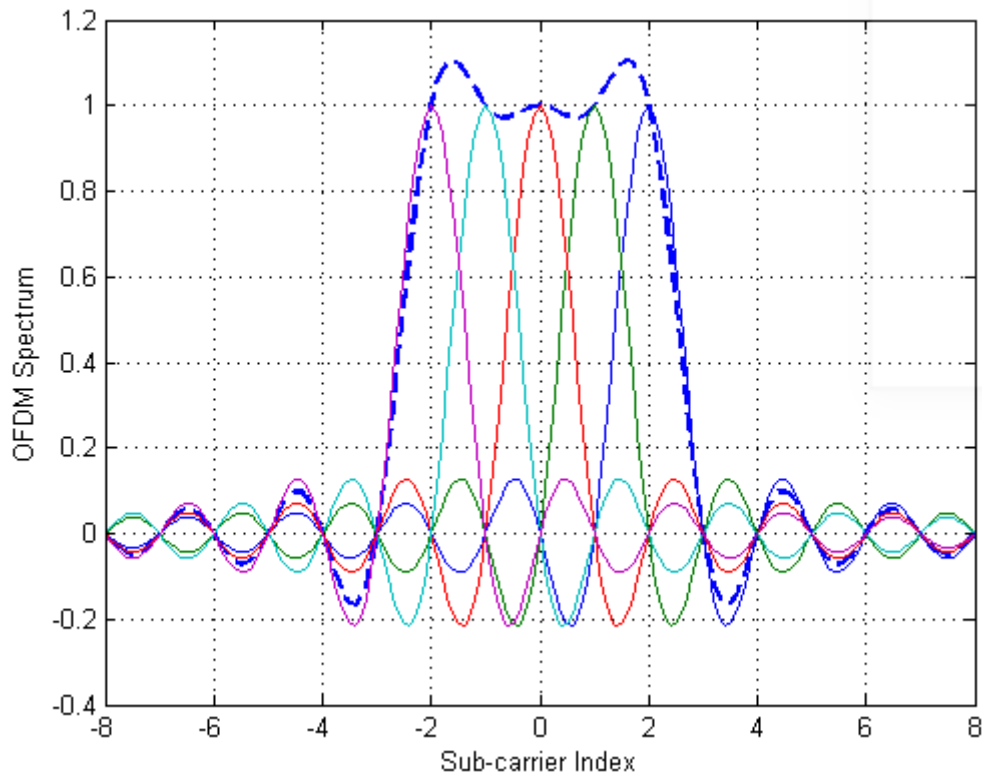


Gráfico 11: Espectro OFDM.
Fuente: (NUTAQ, 2019)

Es importante notar que OFDM al transportar la información en partes, cada una de ellas en un canal de banda angosta, es más resistente a las interferencias y la reconstrucción de la información llevada a cabo por sistemas auxiliares es más efectiva, en relación a una transmisión de la misma información a través de una única portadora de banda ancha. Además, permite prescindir de las bandas de guarda entre portadoras.

Esto incrementa la eficiencia de la transmisión y uso del espectro.

En contraste a los sistemas tradicionales, en donde la transmisión multi portadora era posible, pero considerando las necesarias bandas de guarda entre portadoras (ver Gráfico 12), OFDM usa un sistema de mapeo que permite alcanzar la ortogonalidad. Para su implementación, los sistemas tradicionales prescindían de circuitos independientes para cada portadora, lo cual añade cierta complejidad al sistema. Actualmente el procesamiento es factible realizarlo en un único chip DSP¹⁹.

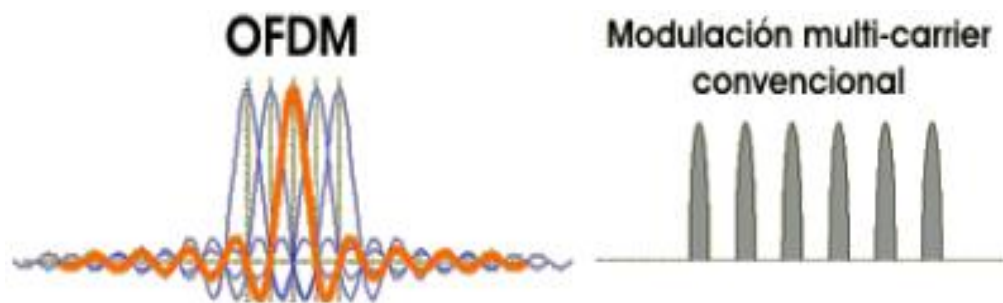


Gráfico 12: Multi-portadora tradicional y OFDM.
Fuente: (BiBing, 2019)

El desarrollo de la electrónica y la computación ha permitido hacer posible y popular a OFDM, ya que se logra hacer la modulación y demodulación mediante el uso de procesamiento de señales (ver Gráfico 13). Particularmente se utiliza la transformada discreta de Fourier y su respectiva inversa. Con ello se consigue un reducido circuito electrónico funcional, en lugar de una compleja circuitería en caso de ser implementado exclusivamente con filtros.

¹⁹ DSP, Digital Signal Processor

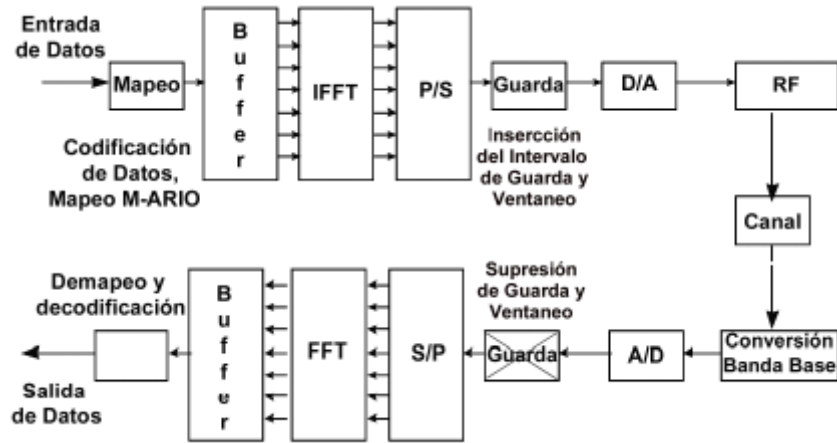


Gráfico 13: Modulador y demodulador OFDM.
Fuente: (Suárez, 2001)

La naturaleza de OFDM de contar con varias subportadoras, hace que este tipo de señal sea más resistente a cualquier tipo de desvanecimiento y a la vez, dado que cada subportadora puede transportar un símbolo, la reconstrucción de información se simplifica y hoy en día, todo este proceso es llevado a cabo por ordenadores y software especializado.

Inclusive, para mitigar la pérdida de información es utilizar rellenos de información redundante que no forma parte de la información del usuario (pero es una parte de ella). Esto se conoce como prefijo cíclico, CP²⁰ y está visualmente representado en el Gráfico 14. Por tanto, la interferencia Inter símbolo ISI casi se elimina.

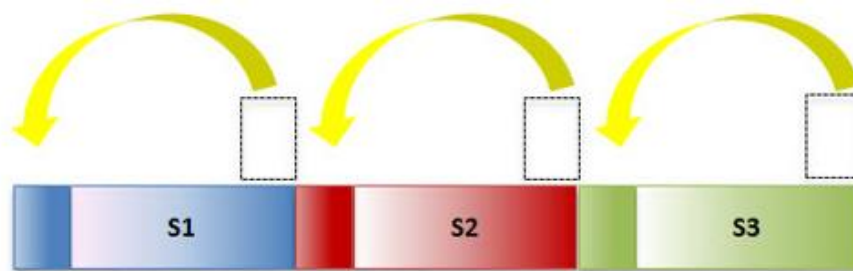


Gráfico 14: Representación del Prefijo Cíclico.
Fuente: (Telecomhall, 2014)

²⁰ CP, Cyclic Prefix

El acceso al medio que se utiliza es OFDMA y es, en resumen, un arreglo entre frecuencia y tiempo. Es decir, un grupo de frecuencias correspondientes a los sub-canales asignados en un intervalo de tiempo, como se puede ver en el Grafico 15.

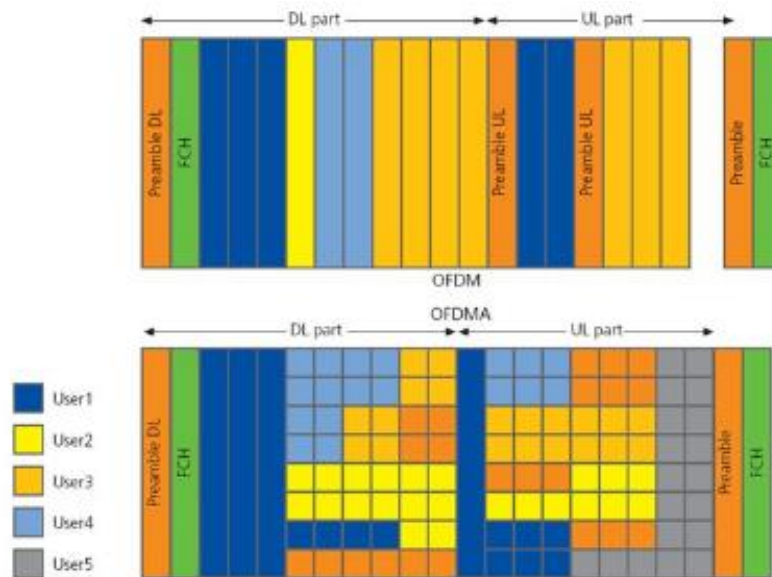


Gráfico 15: OFDM y OFDMA.
Fuente: (SlidePlayer, 2019)

Se puede decir que haciendo uso de OFDMA, varios usuarios pueden compartir el canal. Justamente, para una adecuada asignación de recursos a los usuarios, existen algoritmos que permiten mejorar la eficiencia haciendo asignaciones bajo demanda pues, no todos los usuarios estarán listos para usar del medio en un instante dado.

OFDMA asigna recursos en los dominios del tiempo y la frecuencia.

Sin embargo, como se puede apreciar en lo expuesto, la clave del funcionamiento de OFDM está en la ortogonalidad y la precisión para alcanzarla. Por tanto, y dado que los sistemas electrónicos funcionan con márgenes de tolerancia, la sincronización tanto en tiempo como en frecuencia, viene a ser una limitante para la implementación en sistemas de alto rendimiento que por sí mismos incorporan complejidad en sus diseños. La complejidad en la sincronización se traduce, en los sistemas reales, en más señalización y su consecuente desperdicio de ancho de banda y la necesidad de poder computacional extra.

Los sistemas de comunicaciones canal único también han sufrido notable mejoras en sus diseños, particularmente en los esquemas modulación de banda base y la eficiencia de los filtros. Esto último es más evidente en los sistemas multi-portadora convencionales.

Sin embargo, OFDM es el preferido, excepto en sistemas en donde la sincronización no sea precisa. Entonces, OFDM no es el recomendado.

6.1.3. Técnicas de filtrado y ventaneo usadas en la 5G NR

Como se ha podido observar, OFDM a pesar de tener un predominio en el campo de las comunicaciones inalámbricas, existen algunos problemas que le impiden ser más eficiente. Tal preferencia se la puede observar al día hoy por su implementación en la tecnología de cuarta generación, 4G (4° Generation) y sus enlaces descendentes (3GPP, 2019).

Sin embargo, para abordar los retos de la quinta generación de red móvil, 5G, ha sido necesario rediseñar casi por completo la interfaz aire. Es decir, se buscan nuevas formas de onda que sean flexibles a las demandas de tráfico pronosticadas para el futuro próximo. Para el efecto, el Release 15 del 3GPP²¹ incluye la estandarización de 5G New Radio, NR (Lien et al., 2017).

Para el 5G NR se han estudiado varias alternativas de capa física que sean capaces de sobrellevar los inconvenientes descritos y permita acomodar de manera flexible diferentes tipos de tráfico, con la mayor eficiencia espectral posible. De acuerdo a (Gerzaguet et al., 2017), algunos de las opciones estudiadas para este propósito han sido:

- UFMC, universal filtered multi carrier
- GFDM, Generalized frequency division multiplexing
- FBMC, Filter bank multicarrier
- F-OFDM, Filtered orthogonal frequency division multiplexing
- UF-OFDM, universal filtered orthogonal frequency division multiplexing

Algunas de estas propuestas ya han sido implementadas y probadas en sistemas reales y como es de esperarse, cada una de ellas gozan de la predilección de uno o más fabricantes de equipos de telecomunicaciones. Sin embargo, es un campo aún en debate dado que los diseños implementados hasta la actualidad únicamente son de pruebas.

De acuerdo a (Giordani et al., 2019), se espera un despliegue masivo de las redes 5G desde el 2020 y tendrá un apogeo de aproximadamente 10 años. Esto habilitará una serie de tecnologías emergentes y modificará los modelos de negocios existentes. La ruta de esta evolución se la puede observar en el Grafico 16.

²¹ 3GPP, 3rd Generation Partnership Project

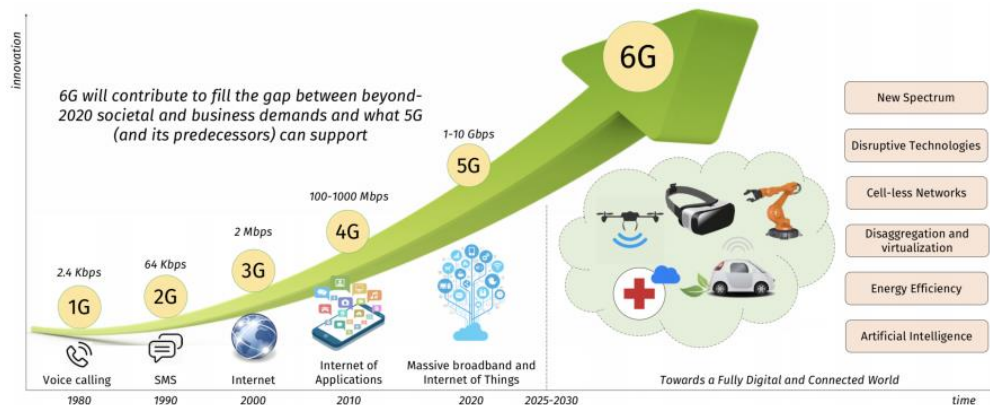


Gráfico 16: Línea de tiempo de las tecnologías de redes móviles.
Fuente: (Giordani et al., 2019)

6.2. F-OFDM

F-OFDM es el acrónimo de Filtered Orthogonal Frequency Division Multiplexing y es una mejora significativa sobre el tradicional OFDM que surge de la necesidad de poder acomodar diferentes tipos de tráfico, de forma óptima sobre una portadora.

Es considerado dentro de la tecnología 5G ya que esta última justamente se caracteriza por permitir el transporte de diferentes tipos de tráfico, desde unos cuantos Kbps generado a través de equipamiento de IoT²² hasta grandes volúmenes con muy baja latencia, como en el caso de la telemedicina, por ejemplo.

Estos flujos utilizarán el mismo medio compartido y considerando lo expuesto en el párrafo anterior, es claro que en el instante en el que una baja demanda de tráfico requiera hacer uso del medio, la eficiencia del mismo sería bajo. Pues, OFDM crea subportadoras con separación constante en frecuencia.

En contraste, F-OFDM toma el ancho de banda asignado y lo divide en bloques, los cuales son independientes y contienen dentro de sí, subportadoras con diferentes separaciones en frecuencia, de acuerdo a las necesidades de cada tráfico que se requieran ajustar en cada bloque.

Según el estudio realizado en (Zhang et al., 2015a) para un canal descendente, F-OFDM permite mejorar hasta en un 46% en throughput en relación al esquema OFDM tradicional. Esto, en gran parte a que los bloques o sub-bandas que se crean dentro del espectro asignado, en cierta forma se adecuan a la demanda de tráfico.

²² IoT, Internet of Things

Se hace mención al termino adecuan ya que, dentro de cada bloque el espaciado de las subportadoras dependerá del ancho de banda de las mismo y esto obviamente, depende de la cantidad de información que se requiera transportar.

6.2.1. Análisis de la operación de F-OFDM

F-OFDM, como se ha expuesto en la sección anterior, segmenta el espectro asignado en sub-bandas o bloques, con la finalidad de que estos sean independientes y a la vez, cada uno de ellos puedan contener su propio espaciado entre subportadoras.

Visualmente, esta teoría puede ser vista como en el Gráfico 17.

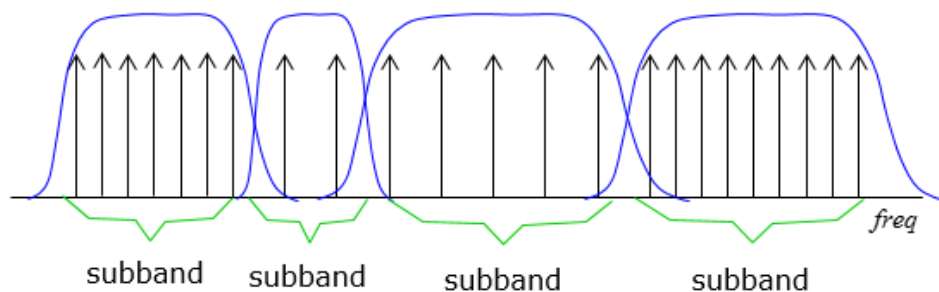


Gráfico 17: Espectro F-OFDM.
Fuente: (Sharetechnote, 2019)

Esta cualidad es resaltada por el fabricante líder de productos de comunicaciones móviles de la actualidad, como aquella que “permite potenciar la flexibilidad y la eficiencia espectral” (Huawei Technologies Co., Ltd., 2019).

Esta característica de espaciado variable entre subportadoras, hace posible la tecnología de Interface Slicing, característica de la tecnología 5G. A la vez, esto da lugar a la otra tecnología subyacente denominada Network Slicing.

Network Slicing permite crear una red virtual y que esta sea configurada como si de una red independiente se tratase, con sus propios recursos. Estos recursos se reservan para el tipo de tráfico que más efectivamente se transporte. En otras palabras, virtualmente, varias redes corren en simultaneo, cada una de ellas con sus respectivas características personalizadas.

En (Ksentini, 2019) se define como Network Slicing a una red lógica independiente de extremo a extremo que corre sobre una infraestructura física compartida. Esta independencia se da en los términos de velocidad de datos, calidad, latencia, seguridad, servicios, etc. Diferentes organizaciones han aunado sus esfuerzos para lograr crear una

arquitectura de red vertical, cada uno de ellos aportando en una función de red en particular, como se puede ver en el Gráfico 18.

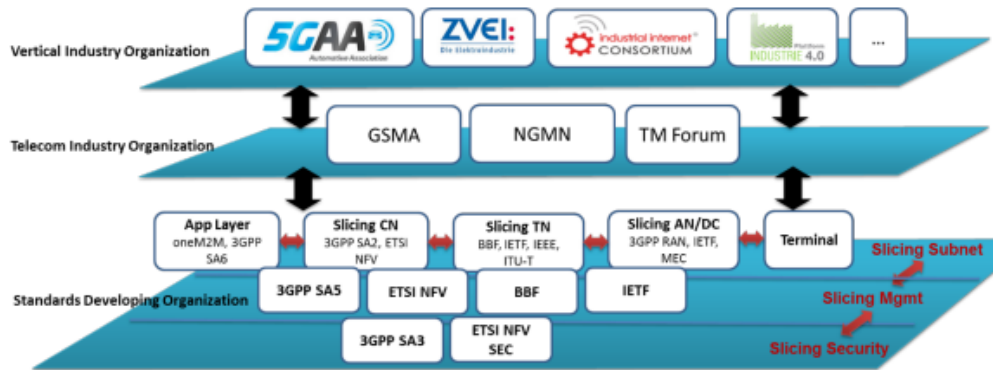


Gráfico 18: Actores del Network Slicing.
Fuente: (Ksentini, 2019)

En esencia, como se menciona en (Wu et al., 2016), para los servicios proporcionados en las redes 5G se espera que “el ancho de banda del sistema sea dividido en varias sub-bandas”, las mismas que serán configuradas de acuerdo al tipo de tráfico y las condiciones asociadas al canal.

En F-OFDM se toma la señal OFDM y cada sub-banda es filtrada con la finalidad de suprimir las emisiones OOB²³. De esta manera, se puede tener menos interferencia entre canales y, por tanto, espaciado entre portadoras, longitud de CP y TTI²⁴ personalizados en función de las necesidades de la transmisión. Por ejemplo, se pueden tener las siguientes configuraciones (Wu et al., 2016):

- Para eMBB²⁵.- alta eficiencia espectral
- Para uRLLC²⁶.- baja latencia, amplio espaciado entre bandas, corto TTI.

Justamente, la intención es mejorar la eficiencia de las formas de onda utilizadas en LTE y para ello, en lugar de la señal TA²⁷ se utiliza un filtrado por UE²⁸, logrando con ello una reducción en la señalización empleada entre el terminal y las estaciones. Esta señalización extra llega a ser un problema conforme el número de UE crece.

²³ OOB, Out-Of-Band

²⁴ TTI, Transmission Time Interval

²⁵ eMBB, Enhanced Mobile Broadband

²⁶ uRLLC, Ultra Reliability and Low Latency Communication

²⁷ TA, Timing Advance

²⁸ UE, User Equipment

Dado que el filtrado es independiente para cada UE, la interferencia entre ellos casi se elimina (Wu et al., 2016) y a la vez que se empieza a prescindir de la extrema precisión requerida en los sistemas LTE para sincronizar las portadoras OFDM.

Dicho esto, de manera esquemática un sistema F-OFDM se compone de los siguientes elementos (ver Gráfico 19):

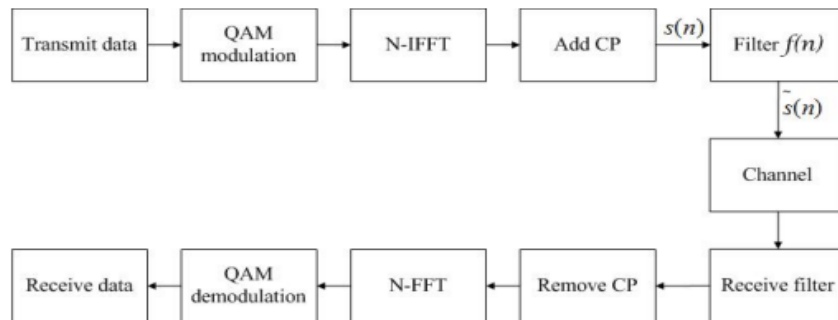


Gráfico 19: Diagrama de bloques de F-OFDM.
Fuente: (Cheng, He, Ge, & He, 2016)

Justamente en el Gráfico 19 se puede observar la presencia de $f(n)$ en el bloque de filtros que evidencia la presencia de filtros por cada sub-banda. Es decir, como se muestra en el Gráfico 20, existe n números de filtros conforme existan n número de bandas.

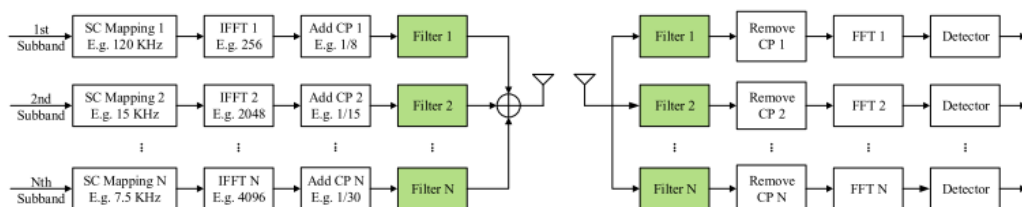


Gráfico 20: esquema de filtros en F-OFDM.
Fuente: (Zhang et al., 2015a)

Cabe mencionar que esos filtros generalmente son digitales de la clase FIR²⁹ y usan el método de ventanas (Cheng et al., 2016). La precisión del “corte” depende del tipo de ventana empleada, pero cualquiera de ellas, de acuerdo al Gráfico 21, muestran mejor pureza de filtrado que puede ser representado técnicamente por el parámetro PSD³⁰, respecto a una señal OFDM nativa.

²⁹ FIR, Finite Impulse Response
³⁰ PSD, Power Spectral Density

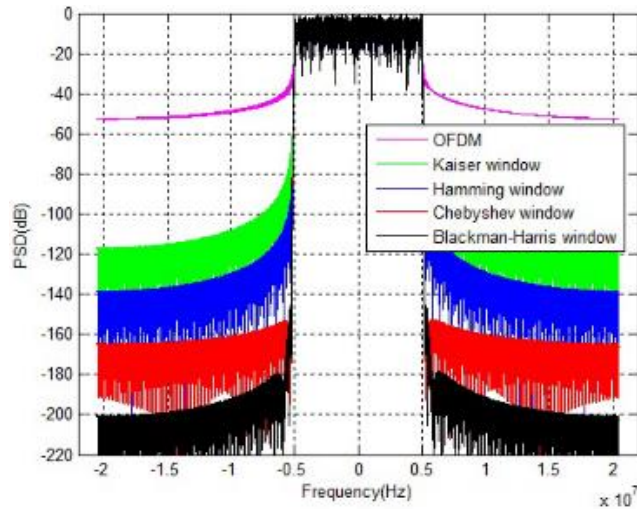


Gráfico 21: PSD de OFDM y F-OFDM en varias ventanas.
Fuente: (Cheng et al., 2016)

De acuerdo a (Cheng et al., 2016) y de lo que se puede apreciar en el Gráfico 21, el valor del PSD de F-OFDM usando la ventana Blackman-Harris cae hasta -200 dB y en promedio, con otras ventanas se tiene -150 dB, puesto respecto a OFDM. Estas mejoras en la reducción de emisiones OBB han sido posibles sin afectar el BER³¹ (en ningún caso), respecto nuevamente a OFDM.

En un esquema visual como el mostrado en el Gráfico 22, se puede observar cómo mediante F-OFDM se pueden acomodar varios servicios.

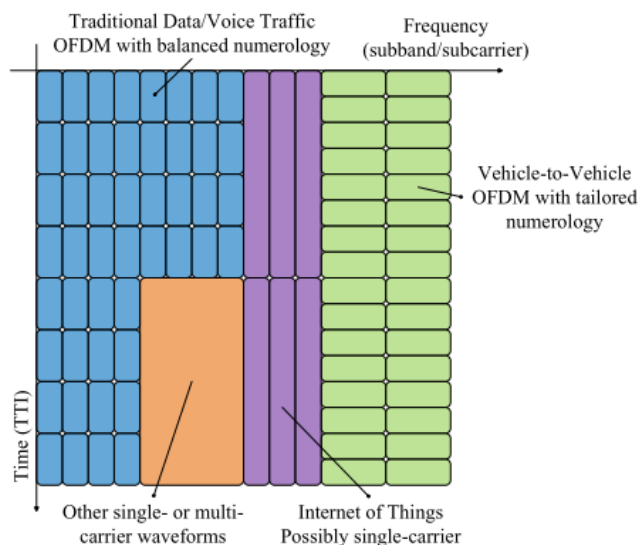


Gráfico 22: Servicios acomodados en una señal F-OFDM.
Fuente: (Zhang et al., 2015)

³¹ BER, Bit Error Rate

De acuerdo al análisis realizado en (Cheng et al., 2016), se ha podido determinar que mientras más alto sea el orden de modulación del sistema F-OFDM, se necesita más altas frecuencias de corte de los filtros pasa banda para mantener el desempeño de la transmisión (BER). Por supuesto, la frecuencia de operación es un factor importante que debe tomarse en cuenta en el diseño ya que de ella depende el comportamiento de una u otra ventana usada (windowing). Dado que se trata de filtros digitales, lo común es que el tipo de filtro a utilizarse en un sistema real, se adapte a las condiciones de la comunicación, con la finalidad de obtener el mejor rendimiento ajustando los diferentes sub sistemas.

En F-OFDM existen los denominados “guard tones” en reemplazo de las “guard bands” usados en LTE pero que representan el espaciado entre sub-bandas; el número de tonos de guarda depende de la sub-banda y, por consiguiente, del tipo de servicio. Esta variabilidad de los tonos de guarda a la vez, permiten tener transmisiones asíncronas.

Recordando las desventajas de OFDM tradicional, como por ejemplo altos valores de PAPR³² y emisiones OOB, F-OFDM es una de las alternativas para mejorar estos parámetros, según (Jayan & Nair, 2018).

Mediante el parámetro PSD se puede precisar la eficiencia espectral de un sistema; según el estudio realizado por (Jayan & Nair, 2018), F-OFDM recorta mejor los lóbulos laterales de la señal estudiada, respecto a OFDM aplicado sobre la misma señal. Esto se puede observar en los Gráficos 23 y 24. Es decir, con F-OFDM se logra mejor eficiencia espectral.

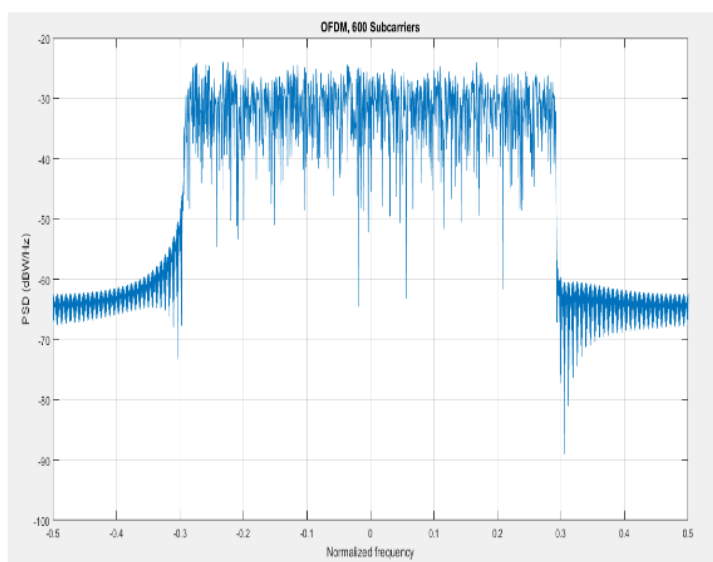


Gráfico 23: PSD de OFDM.
Fuente: (Jayan & Nair, 2018)

³² PAPR, Peak-to-Average Power Ratio

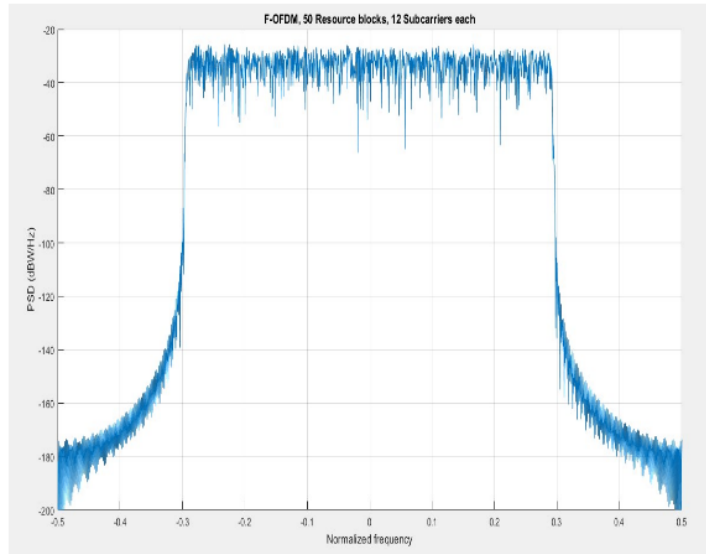


Gráfico 24: PSD de F-OFDM.
Fuente: (Jayan & Nair, 2018)

De igual manera, en el mismo análisis de (Jayan & Nair, 2018), se hace una comparación del BER generado tanto por OFDM (Gráfico 25) como para F-OFDM (Gráfico 26). Es claro que las dos tendencias se mantienen. Es decir, la calidad de la comunicación se mantiene.

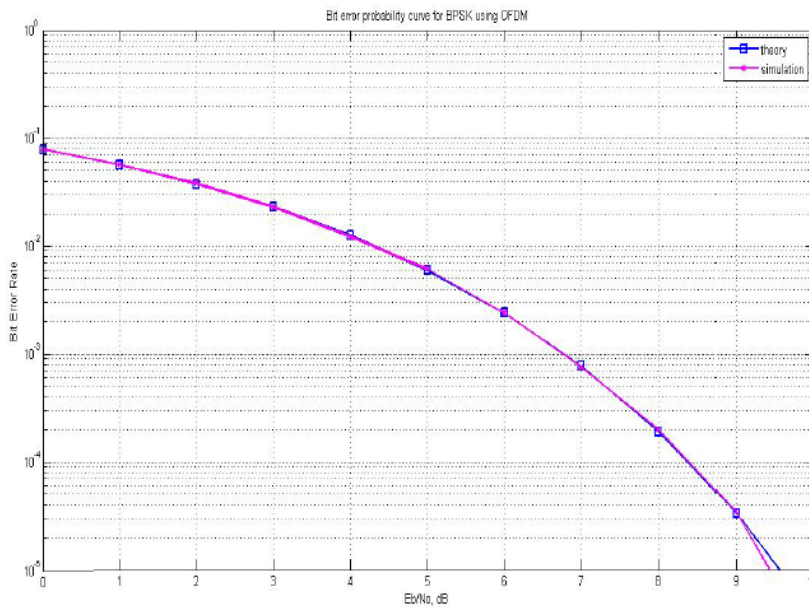


Gráfico 25: BER para OFDM.
Fuente: (Jayan & Nair, 2018)

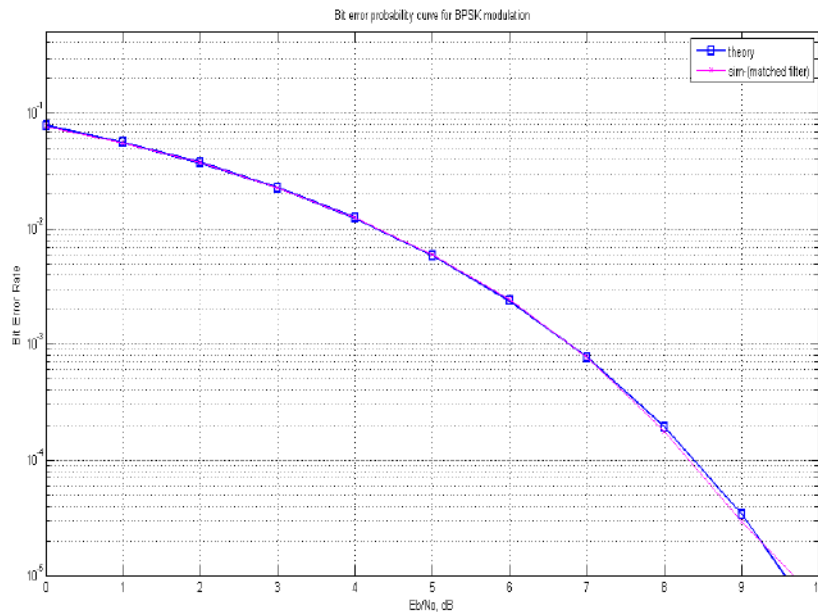


Gráfico 26: BER de F-OFDM.
Fuente: (Jayan & Nair, 2018)

6.2.2. Aplicaciones

De acuerdo a varios estudios realizados, entre ellos por ejemplo el análisis de (Borges et al., 2019) en donde se menciona que F-OFDM está siendo utilizado en varias pruebas de sistemas de ultra banda ancha que han alcanzado hasta los 4,41 Gbit/s. Es entonces, un esquema ideal para el estándar 5G ya en desarrollo a nivel mundial. También se hace mención a que F-OFDM podría ser usado en WDM-PON³³.

Así también, en el análisis realizado por (Gonzaga Ferreira, Teles Vieira, Felix, De Souza, & Pereira Franco, 2018), se utiliza a F-OFDM para habilitar una tecnología heurística denominada Programación Evolutiva (EP³⁴) con la finalidad de optimizar la asignación de recursos inalámbricos; la computación aplicada también le saca provecho a las cualidades de F-OFDM.

Así, se puede observar que F-OFDM permite alcanzar mejores tasas de transmisión sin perder calidad, mejor eficiencia y, sobre todo, habilita el desarrollo de otras tecnologías conexas.

6.2.3. Ventajas y desventajas

Las redes 5G están diseñadas para funcionar inicialmente en modo non-standalone, de modo que requieren del soporte heredado de las redes tradicionales. Es decir, 5G en su

³³ WDM-PON, Wavelength Division Multiplexing-Passive Optical Network

³⁴ EP, Evolutionary Programming

primera fase deberá coexistir con las redes 4G y como hemos visto, sus correspondientes formas de onda no son compatibles. Por tanto, es necesario que la operación simultánea de estos sistemas sea en bandas de frecuencia diferentes, muy probablemente serán colaterales.

En ese sentido, es vital considerar en el diseño de 5G NR la posibilidad de coexistencia y justamente, como se puede ver en el Gráfico 27, F-OFDM permite adaptarse a un ancho de banda variable. Esto posibilitará una migración paulatina hasta alcanzar una red 5G standalone pura.

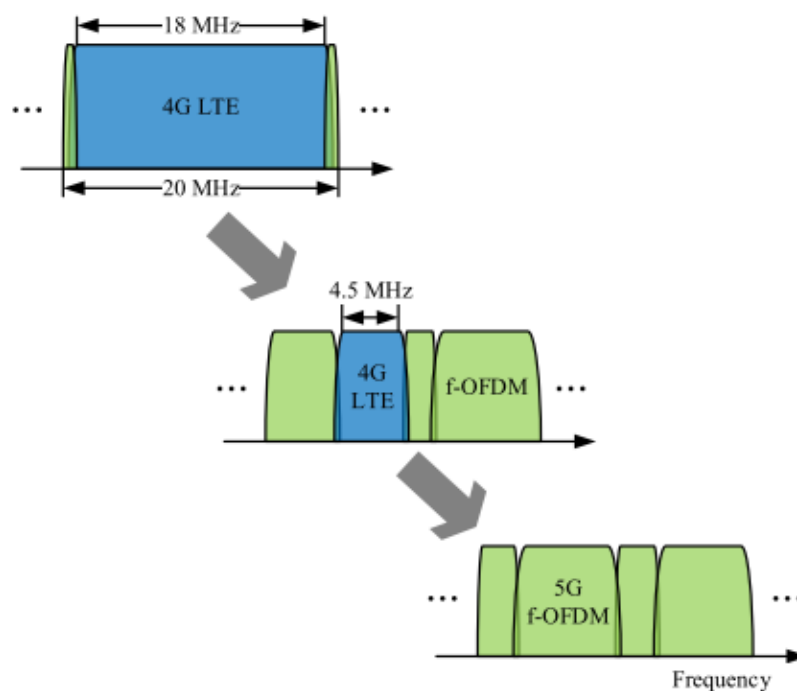


Gráfico 27: Adaptabilidad de F-OFDM en el espectro.
Fuente: (Zhang et al., 2015a)

F-OFDM también permite hacer un uso más efectivo del espectro en función de los servicios que están haciendo uso del medio, gracias a la variabilidad del espaciado entre sub-bandas. Es decir, esta forma de onda es más flexible y se adecúa a la demanda.

Como resultado del análisis realizado en (Zhang, Jia, Chen, Ma, & Qiu, 2015b), si el esquema de modulación es de orden bajo (16 QAM y QPSK) los tonos de guarda no son necesarios. Pero cuando se utilizan altos ordenes de modulación, son necesarias al menos 2 tonos de guarda.

6.3. UF-OFDM

La tecnología UF-OFDM³⁵ ha sido desarrollada e impulsada por Alcatel-Lucent Bell Laboratories y, según lo descrito en (Farhang-Boroujeny & Moradi, 2016), esta tecnología responde a una combinación entre ZP-OFDM³⁶ y OFDM.

Como referencia recordatoria, se puede decir que ZP-OFDM es una técnica que usa el concepto de redundancia cíclica, pero, este CP es un relleno de ceros (Zero Padding) cumpliendo la misma funcionalidad: evitar la ISI.

Claro, generar ceros es más fácil que tomar una porción de información y colocarla en otro sitio. A este reemplazo de del CP se le denomina “soft-symbol”.

En el Gráfico 28 se puede observar un diagrama de bloques de un sistema transmisor/receptor ZP-OFDM; particularmente, se puede apreciar la presencia del componente agregador de ceros.

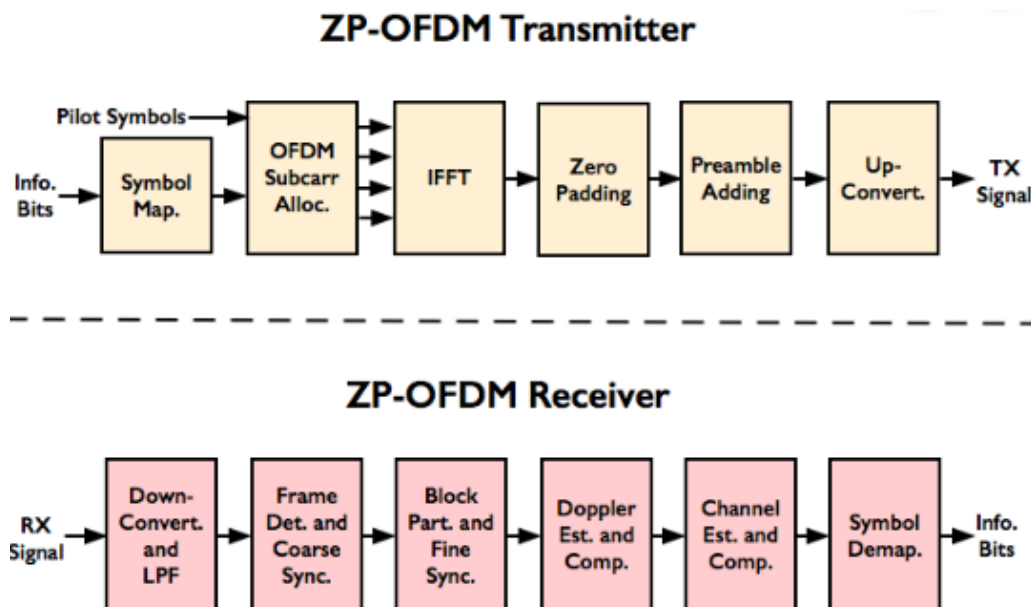


Gráfico 28: Transmisor y receptor de ZP-OFDM.
Fuente (Demirors, Alba, Santagati, & Melodia, 2016)

De acuerdo a (Demirors, Alba, Santagati, & Melodia, 2016), ZP-OFDM se caracteriza por proporcionar una alta eficiencia energética y por tanto, es ideal para ser implementado en equipamiento que emplea baterías.

³⁵ UF-OFDM, Universal Filtered OFDM

³⁶ ZP-OFDM, Zero Padding Orthogonal Frequency Division Multiplexing

Como se explica en (Farhang-Boroujeny & Moradi, 2016), UF-OFDM puede ser considerada como una técnica de multi portadoras no ortogonales, sin embargo esta no ortogonalidad es muy baja. Es decir que, para una gran cantidad de usuarios, se va perdiendo la ortogonalidad entre subportadoras; esta particularidad está dada generalmente en función del canal.

Por tanto, es apropiado llamar a UF-OFDM como un OFDM quasi ortogonal.

UF-OFDM es también conocido como UFMC³⁷.

6.3.1. Análisis de la operación de UF-OFDM

UF-OFDM, como ya se ha anotado en los párrafos previos, es una combinación de otras técnicas ya conocidas. Es decir que, una vez mapeados los bits con cualquier esquema de modulación y estos pasen a través de un procesamiento IFFT, a la vez que se requiere añadir un relleno de ceros, mismos que son generados sin mayor carga computacional.

Posteriormente, esta salida serial pasa por un filtro pasa-banda para remover las emisiones OOB; esto, en el lado del transmisor.

Este proceso puede ser visualizado en el Gráfico 29.

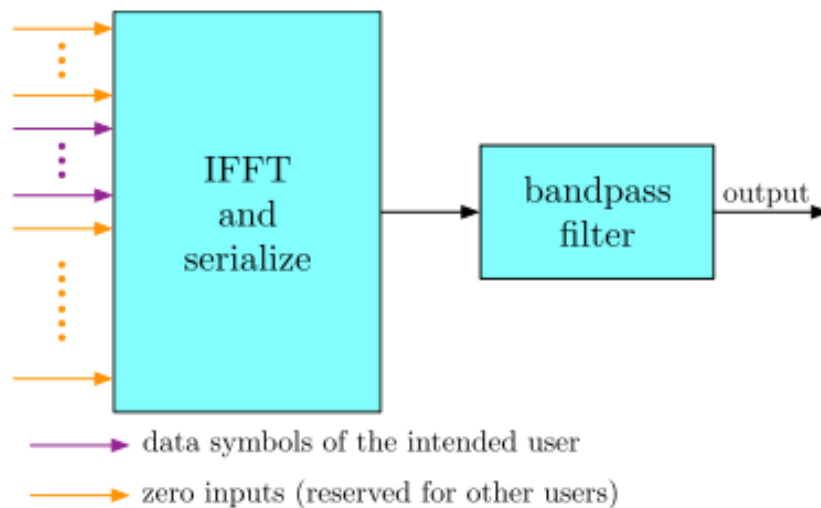


Gráfico 29: Modulador ZP-OFDM.
Fuente: (Farhang-Boroujeny & Moradi, 2016)

En las soluciones de UF-OFDM es posible eliminar completamente la ISI si la longitud de cada símbolo es exactamente $N+N'$. analizando este comportamiento en el dominio temporal, esto es equivalente a agregar una banda de guarda.

³⁷ UFMC, Universal Filtered Multi-Carrier

En cuanto al filtrado, cualquier filtro pasa bandas que cubra todas las sub portadoras de la señal podría ser utilizado. Pero, en (Farhang-Boroujeny & Moradi, 2016) se recomienda el uso de filtros del tipo Dolph-Chebyshev.

Una vista más completa de un sistema UFMC se puede observar en el Grafico 30.

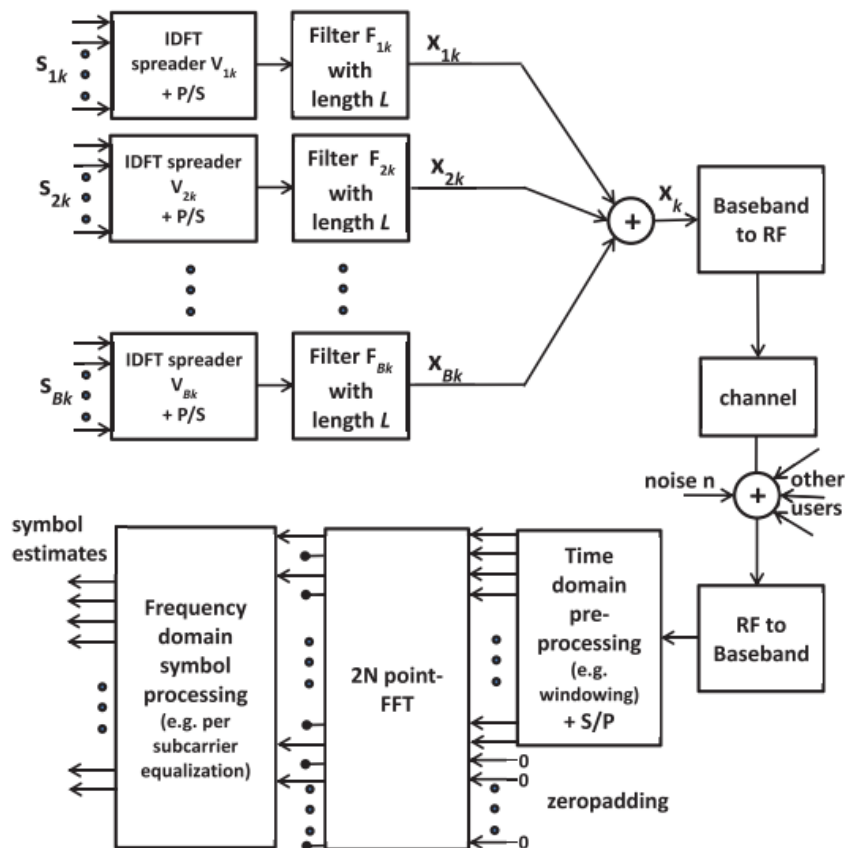


Gráfico 30: Sistema UFMC/UF-OFDM.
Fuente: (Wild & Schaich, 2015)

De acuerdo a (Wild, Schaich, & Chen, 2014), UFMC o UF-OFDM, que son nombre equivalentes, es una combinación de FBMC³⁸ y F-OFDM. El mismo estudio resalta que UF-OFDM es espectralmente más eficiente que un OFDM convencional, como CP-OFDM por ejemplo.

De la misma manera que F-OFDM, también UF-OFDM realiza un filtrado de sub-bandas por separado, logrando disminuir las emisiones OOB (Wild & Schaich, 2015). La complejidad del sistema depende de la cantidad de sub-bandas que se quieran filtrar por

³⁸ FBMC, Filter Bank Muti Carrier

separado; según la cita anterior, la complejidad del sistema UF-OFDM se complica aproximadamente en un factor de 10.

Esto podría representar un gran problema para el desarrollo de las radio bases; por ello en (Wild & Schaich, 2015) se propone una solución de transmisor que opera en función del tiempo y con ello, se logra disminuir la complejidad del trasmisor y consecuentemente, los receptores. De hecho, se trata de aproximar a que un solo filtro involucre toda la banda utilizada.

Básicamente, en UF-OFDM el ancho de banda utilizado, mismo que contiene un número determinado de portadoras, es dividido en N sub-bandas y el número de subportadoras que las mismas contendrán dependen del servicio que a través de ésta se vaya a transmitir, es decir depende del Service Type.

Visualmente, la estructura de las bandas en UFMC se puede observar en el Gráfico 31.

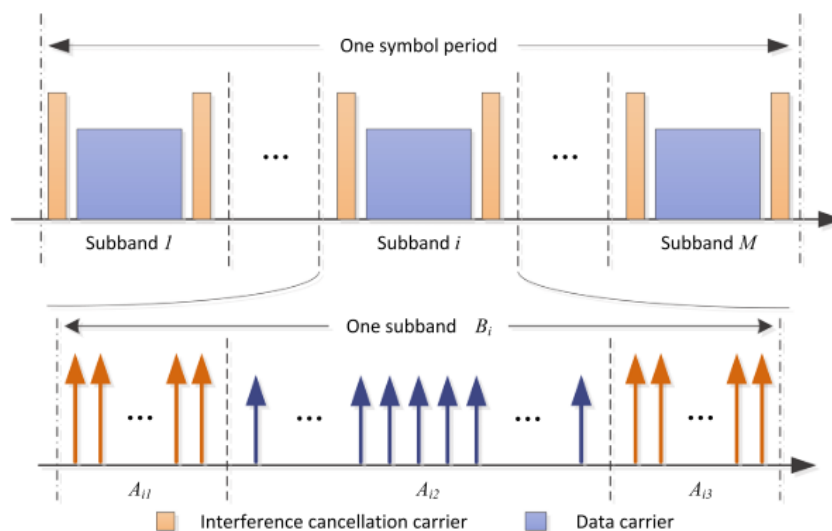


Gráfico 31: Distribución de sub-bandas en UFMC.
Fuente: (Chen & Yu, 2018)

La cantidad de sub-banda es justamente un parámetro de diseño y a diferencia de F-OFDM, el tamaño de las sub-bandas no es flexible. De acuerdo a (Share Tech Note, 2020), a mayor número de portadoras dentro de una sub-banda, la carga computacional es menor, pero, el desempeño final del sistema se ve comprometido. La distribución de las sub-bandas en UFMC se puede observar en el Gráfico 32.

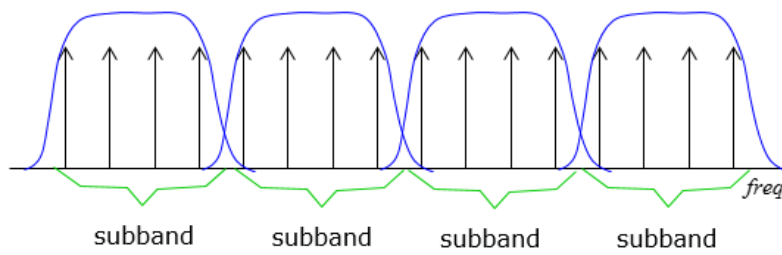


Gráfico 32: Portadoras y sub-bandas de UPMC.
Fuente: (Share Tech Note, 2020)

En definitiva, el objetivo de aplicar filtros por bloques dentro del espectro utilizado es disminuir las emisiones OOB; entonces, como el resultado se tienen un espectro como el que se puede visualizar en el Gráfico 33. Diferentes tipos de filtros pueden ser aplicados en las diferentes sub-bandas.

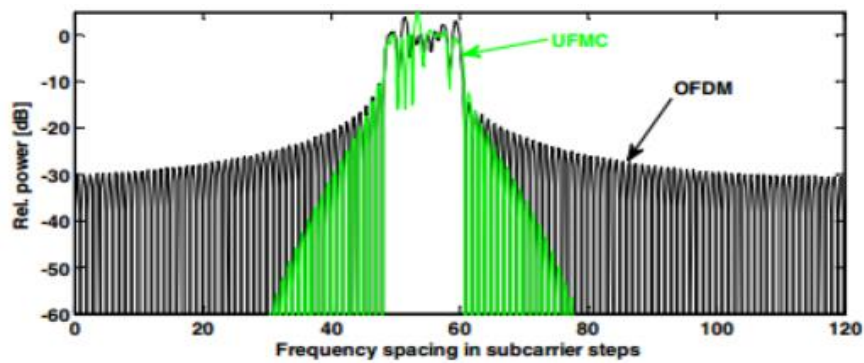


Gráfico 33: Espectro de una subportadora en UPMC.
Fuente: (Share Tech Note, 2020)

Para una aplicación real, el espectro es la adyacencia de los espectros de cada sub-banda como el mostrado en el gráfico anterior. Es decir, se tiene un espectro como el indicado en el Gráfico 34.

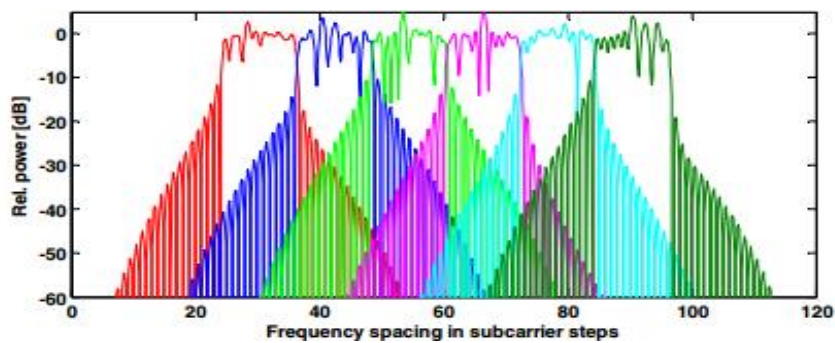


Gráfico 34: Espectro de una señal UPMC.
Fuente: (Share Tech Note, 2020)

Según (Yongxue, Sunan, & Weiqiang, 2019), para una señal de 320 portadoras se puede obtener un valor PSD de -20 dBW/Hz, utilizando un esquema OFDM con CP, como se aprecia en el Gráfico 35; sin embargo, al hacer uso de UFMC, fácilmente se puede alcanzar los -60 dBW/Hz de PSD, como se puede observar en el Gráfico 36. Para el caso de la gráfica de UFMC, las 320 portadoras han sido distribuidas en 8 bandas de 40 portadoras cada una, y las mismas no se interfieren mutuamente o, lo que es lo mismo, no existe ICI.

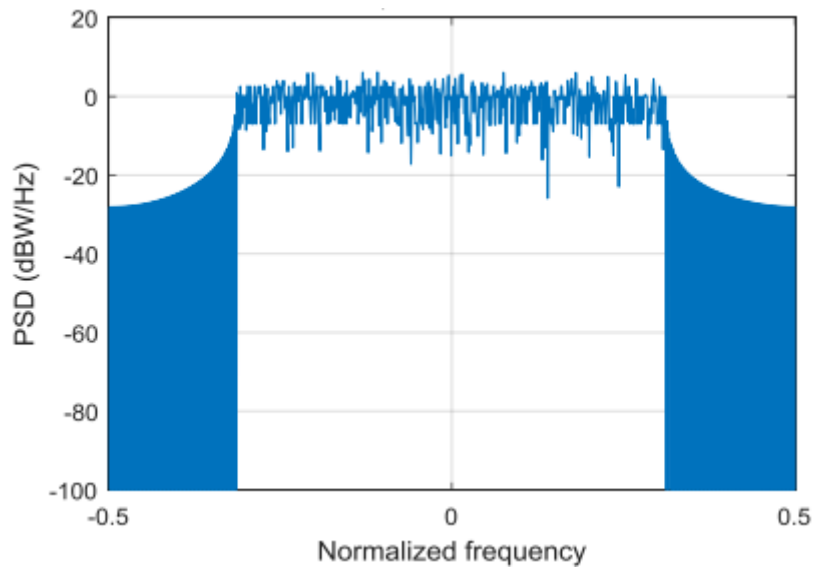


Gráfico 35: PSD de OFDM.
Fuente: (Yongxue et al., 2019)

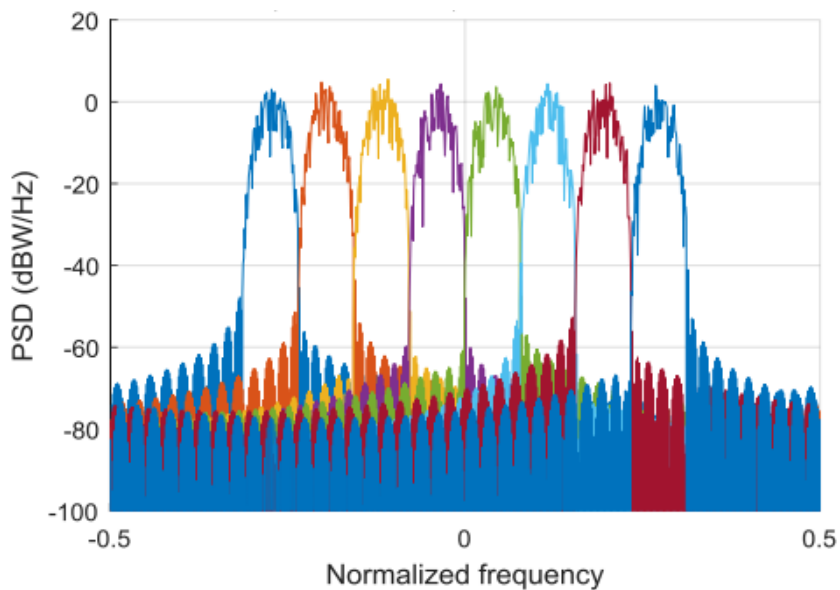


Gráfico 36: PSD de UFMC/UF-OFDM.
Fuente: (Yongxue et al., 2019)

En lo que respecta al multiacceso, estudios como el de (Wild et al., 2014) sugieren que se debería utilizar IDMA³⁹, mismo que ha llamado la atención para su adopción en sistemas multi-portadora. Considerando que la ISI y la MAI⁴⁰ son los principales “peligros” de una red inalámbrica, en (Guo, Yuan, & Ping, 2007) se considera a IDMA como la mejor alternativa para el acceso al medio.

Como se puede ver en el Gráfico 37, IDMA tiene un mejor rendimiento que OFDMA y con menor potencia de transmisión se logra un VER equivalente al de OFDM. Es decir, IDMA-OFDM es más eficiente que OFDMA.

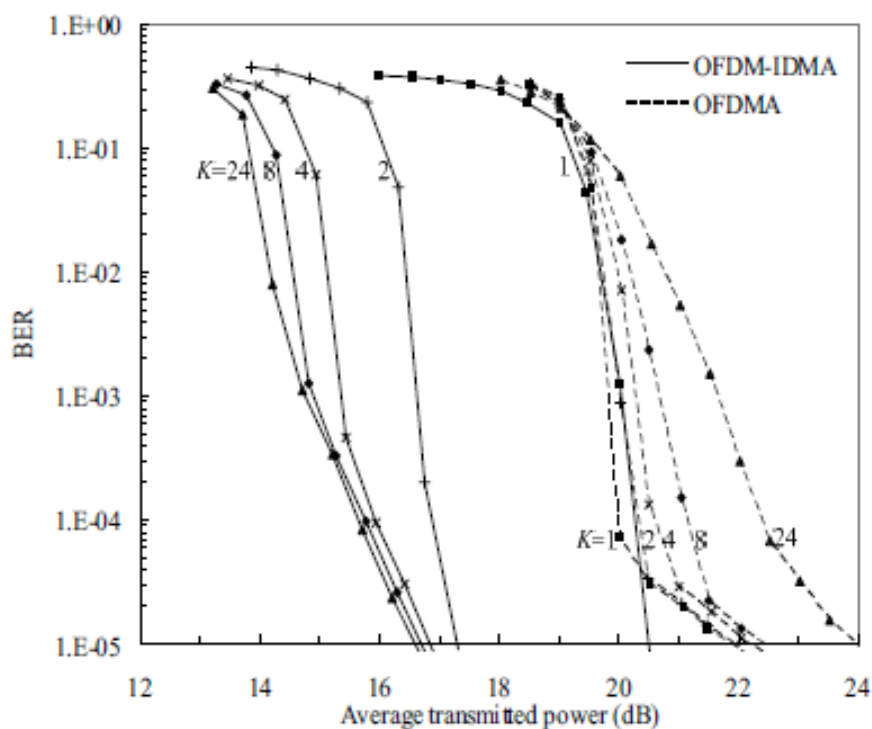


Gráfico 37: BER de IDMA-OFDM versus OFDMA.
Fuente: (Guo et al., 2007)

Esquemáticamente, IDMA para OFDM se visualiza como en el Gráfico 37. La clave del funcionamiento y a la vez, el diferenciador de IDMA es el bloque “interleaver” (entrelazado) que se puede observar en el Gráfico 38; este entrelazado, más un detector iterativo de frecuencias resuelven exitosamente en problemas de ISI y MAI.

³⁹ IDMA, Interleave-Division Multiple-Access

⁴⁰ MAI, Multiple access interference

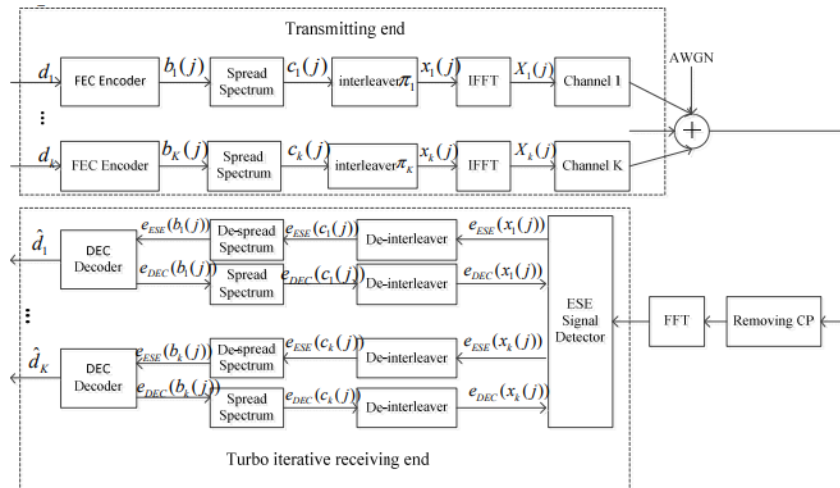


Gráfico 38: Transmisor y receptor de IDMA-OFDM.
Fuente: (WANG, Yu, Cheng, Yang, & Wang, 2013)

En todo caso, como se anotó anteriormente, el desarrollo de los filtros para las sub-bandas incrementa la complejidad del sistema, aunque por otro lado permite lograr controlar mejor las emisiones OOB. Por ello, se debe encontrar un equilibrio entre estos dos criterios y entonces, la cantidad y tipo de filtros a utilizarse se convierte exclusivamente en un parámetro de diseño.

6.3.2. Aplicaciones

UFMC se adapta mejor a ráfagas de datos y, por tanto, su desempeño en sistemas maquina a máquina o IoT son las principales aplicaciones de esta tecnología. Dado que la próxima generación 5G se planifica para que cubra con las tecnologías móviles e IoT, UFMC se convierte en una seria alternativa a ser considerada y en efecto, el 5GNOW lo considera dentro de las formas de onda con mayor potencial para soportar los requerimientos flexibles de datos.

Sin lugar a dudas, también se debe considerar que UFMC segmente el espectro en sub-bandas y cada una de ellas puede ser tratada de forma independiente y, por tanto, su aplicación también está en todas aquellas tecnologías multi servicio que a futuro se desarrollen.

6.3.3. Ventajas y desventajas

Como se indica en el análisis (Wild et al., 2014), UF-OFDM demuestra mejor desempeño con ráfagas de datos. Precisamente, en 5G se espera que gran cantidad de información sea generada por dispositivos conectados a Internet, y aplicaciones de software. Así también, se gana en un 10% la eficiencia en cuanto a la ocupación del espectro, así como

también algunas decenas de dB más bajo para los lóbulos laterales de la frecuencia central de operación.

UF-OFDM además permite disminuir la cantidad de señalización que en entorno de radio requiere para las tareas de sincronización, tanto en tiempo como en frecuencia. En consecuencia, la vida útil de las baterías se puede extender y a la vez, los dispositivos terminales pueden ser más baratos.

Dado que esta forma de onda es flexible ante los diferentes escenarios de carga, posibilita la creación de un marco común de la estructura de datos.

El desarrollo de OFDM ha generada una amplia gama de variantes con la finalidad de ajustarse a los diferentes entornos; UF-OFDM puede reutilizar todo este conocimiento para desarrollar el hardware y/o softwares necesarios para su operación y aplicación práctica. Mientras hay ciertas variantes de OFDM que requieren el desarrollo de nuevas teorías para su realización.

6.4. Comparación de F-OFDM y UF-OFDM

Para tener un panorama comparativo entre F-OFDM y UF-OFDM/UFMC, y de acuerdo a las comparaciones realizadas en (Cheng et al., 2016), los parámetros PSD, EVM⁴¹ y BER pueden ser empleados.

La PSD permite conocer la concentración de potencia y lo deseable es que gráficamente se muestre un espectro constante dentro del ancho de banda utilizado.

El EVM nos permite conocer la precisión con la que se logran decodificar los bits recibidos y si su valor se incrementa, también lo harán los errores. Idealmente el EVM debe tender a cero.

BER es la medida de errores en los bits disponibles a la salida del receptor respecto a los bits ingresados en el transmisor y cuando su valor es bajo las imperfecciones pueden ser corregidas por los algoritmos de capa física.

Juntos, estos parámetros nos pueden dar una idea de la efectividad de F-OFDM y UF-OFDM, motivo del presente estudio.

6.4.1. Modelo de simulación

Para evidenciar el comportamiento, en este caso, se procederá a elaborar una simulación que toma valores de sistemas funcionales, a fin de poder mostrar la operación de los sistemas aquí estudiados.

⁴¹ EVM, Error Vector Magnitude

Primeramente, se toma como base los scripts funcionales publicados en (MathWorks, 2019) y (MathWorks, 2019). De aquí, se han hecho adecuaciones para hacer una evaluación entre los sistemas aquí estudiados.

Se han considerado parámetros como el SNR, orden de modulación, cantidad de subportadoras, longitud del prefijo cíclico, como los más relevantes. Aparte, hay parámetros de los filtros utilizados en cada sistema, los cuales son muy importantes ya que inciden directamente en la eficiencia de la transmisión.

Así, por ejemplo, según (Ligo Wave, 2019) valores entre 18 y 30 de SNR son óptimos. En nuestro modelo de simulación se usó un valor de 25, que se encuentra dentro de indicado por la experiencia y la bibliografía. Evidentemente, valores muy bajos para esta variable equivaldría a una excesiva distorsión de la señal útil y que, más bien, pasa a formar parte del ruido. Por el contrario, un valor muy alto correspondería a un escenario ideal, en donde no exista interferencias ni atenuación de la señal, lo cual es impráctico.

Para el valor de la ventana de procesamiento FFT, conforme se indica en (OCW, 2018), se consideró un valor intermedio, 1024, a fin de poder obtener un equilibrio entre resolución y picos de ruido. De hecho, un valor más elevado, si bien proporciona mayor definición de la señal, también incrementa la demanda de los recursos computacionales.

El script de simulación realizará un análisis de OFDM, F-OFDM y UF-OFDM, compartirán la misma entrada de datos, que es generada de forma aleatoria.

A partir del procesamiento se consideran tres parámetros para poder evaluar a los tres sistemas estudiados en este documento. Estos son: la densidad espectral de potencia, la magnitud del vector de error y la razón de errores de bits; los mencionados parámetros serán descritos en los siguientes literales (6.4.2, 6.4.3 y 6.4.4).

Para desarrollar el script de simulación se hará uso del software Matlab dado a que este dispone de una amplia gama de funciones matemáticas para el procesamiento requerido en este estudio. Además, existe suficiente información para cubrir el asunto estudiado.

Asimismo, es necesario hacer notar que el rendimiento de un sistema de comunicaciones depende del orden de modulación, digital en este caso, que se utilice. Por tanto, el modelo de simulación incluye la posibilidad de cambiar este parámetro y visualizar el comportamiento del sistema.

En definitiva, las primeras líneas del script corresponden a los parámetros del sistema, mismos que pueden ser ajustados a fin de observar y evaluar los resultados.

Sin lugar a dudas, la parte central del modelo de simulación radica en los filtros que se usan para obtener mejores resultados que OFDM y son característicos de F-OFDM y UF-OFDM.

Las variables de los filtros fueron tomadas de los diseños publicados en (MathWorks, 2019) y se aplican en una señal de 50 bloques de recursos (RB⁴²) con 12 subportadoras o, un equivalente de 50 sub-bandas de 12 subportadoras en cada una, tanto para F-OFDM y UF-OFDM, respectivamente.

La cantidad de subportadoras dentro de cada segmento, sea esta una sub-banda o bloque de recursos, influye directamente en el rendimiento del sistema.

De acuerdo al desarrollo de las especificaciones técnicas de la capa física para el 5G, existe una variedad de configuraciones de bloques de recursos, pero considerando que cada bloque físico aloja 12 subportadoras. En la tabla 1 se puede observar la numerología disponible.

*Tabla 1. Numerología para las tramas de capa física 5G NR.
Fuente: (Keysight, 2017)*

μ	Min RB	Max RB	Sub-carrier spacing (kHz)	Freq BW min (MHz)	Freq BW max (MHz)
0	24	275	15	4.32	49.5
1	24	275	30	8.64	99
2	24	275	60	17.28	198
3	24	275	120	34.56	396
4	24	138	240	69.12	397.44

Considerando lo expuesto, el modelo de simulación aquí desarrollado toma 12 subportadoras por cada RB para el caso de F-OFDM e igualmente, 12 subportadoras por cada sub-banda para el caso de UF-OFDM. Es decir, se hará uso del orden numerológico (μ) 0.

⁴² RB, Resource Block

Estas son las variables más relevantes y que forman parte inherente del caso de estudio; los demás parámetros se consideran auxiliares.

A continuación, se analizarán las salidas del modelo de simulación.

6.4.2. PSD

Según lo indicado en (Cheng et al., 2016), la densidad espectral de potencia (PSD) es una buena forma de poder evaluar la eficiencia de F-OFDM, y por tanto también de UF-OFDM/UFMC. Pues, este valor nos da a conocer la distribución de energía tomando como referencia a la frecuencia. Lo ideal sería tener una distribución uniforme de energía sobre todos los símbolos y dada la naturaleza de los esquemas modulación estudiados, se evidenciarían frecuencias de corte bastante pronunciadas, hasta lograr valores de ruido extremadamente bajos.

En el Grafico 39 se puede verificar visualmente que la PSD para F-OFDM es casi constante a través de toda la señal.

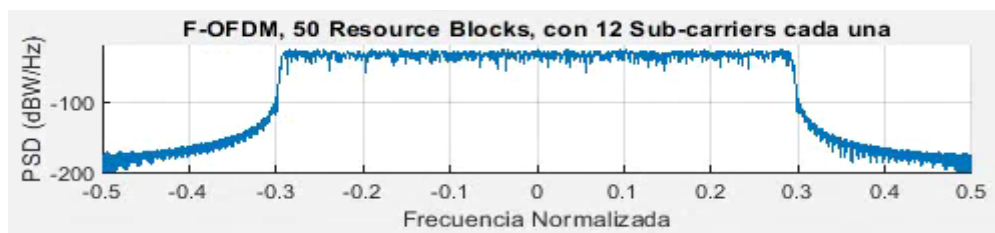


Gráfico 39. PSD de F-OFDM.
Fuente: autoría propia.

Aquí, se tiene una buena frecuencia de corte con la que se alcanza un valor de piso alrededor de -100 dBW/Hz. De esta forma, es posible colocar otras señales en las adyacencias del espectro analizado.

En contraste, este mismo parámetro para una señal UF-OFDM alcanza un valor de piso de alrededor de -20 dBW/Hz, como se puede observar en el Grafico 40.

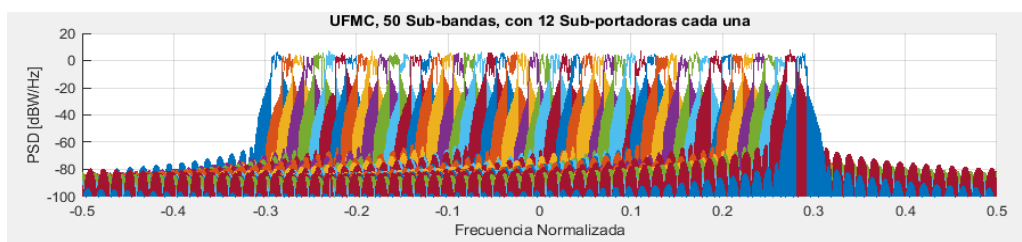


Gráfico 40. PSD de UF-OFDM/UFMC.
Fuente: autoría propia.

En cambio, si se analiza una señal OFDM, como se puede visualizar en el Gráfico 41, existe una inestabilidad (aunque no significativa) del PSD a través todo el espectro en cuestión y se tienen valores de piso de alrededor de -40 dBW/Hz.

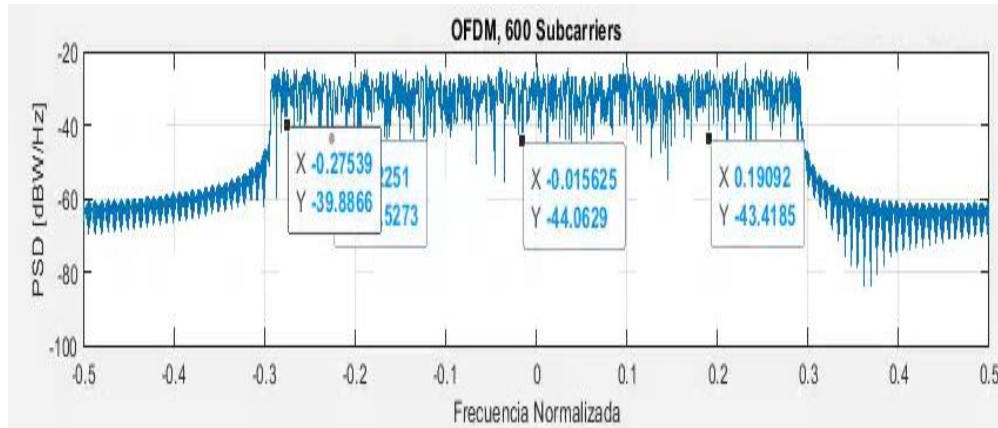


Gráfico 41. PSD de OFDM.
Fuente: autoría propia.

A pesar de que el valor de piso del PSD para un esquema OFDM es bajo respecto a UF-OFDM, dada la inestabilidad a lo largo del ancho de banda utilizado bandas de guarda más amplias son necesarias para evitar la ISI.

La estabilidad del valor PSD es clave para poder optimizar el uso del espectro mediante la agrupación adyacente de señales, Los filtros logran la “pureza” de las señales y el corte adecuado en los extremos del ancho de banda utilizado, permitiendo que más allá de estos límites la superposición en las bandas laterales no afecte a la decodificación de los símbolos.

6.4.3. EVM

El EVM nos permite conocer la precisión con la que se logra decodificar una señal y en este caso particular, se calcula luego de haber agregado ruido (imitando a un canal de transmisión).

Se puede observar en el Gráfico 42 que para un esquema 256 QAM y usando F-OFDM el valor del EVM es 3.7%.

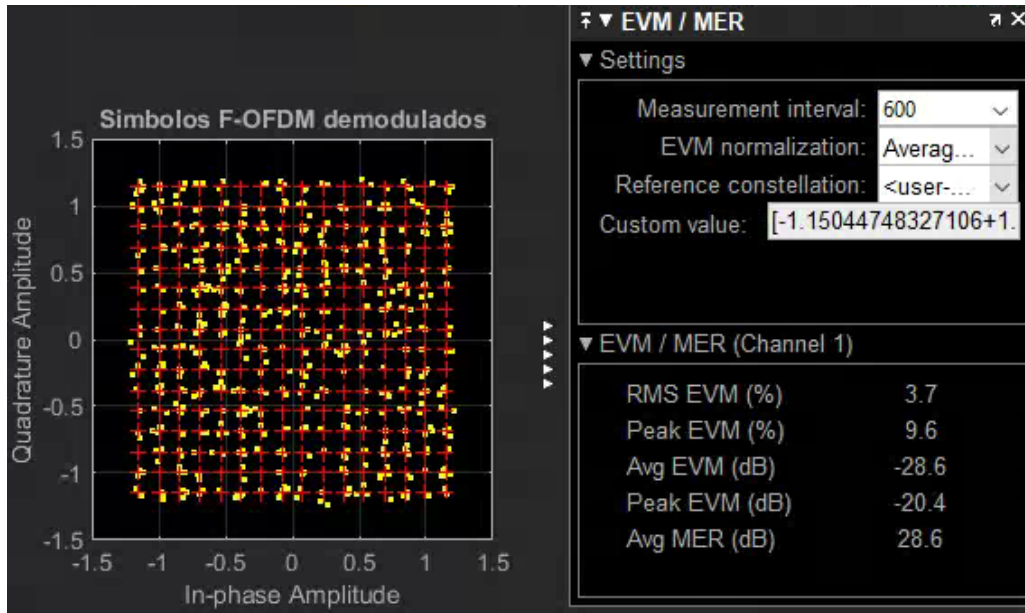


Gráfico 42. EVM de F-OFDM con 256 QAM.
Fuente autoría propia.

Mientras tanto, usando los mismos 256 QAM pero con UF-OFDM, el valor del EVM es de 4.2%. Esto se puede apreciar en el Gráfico 43.

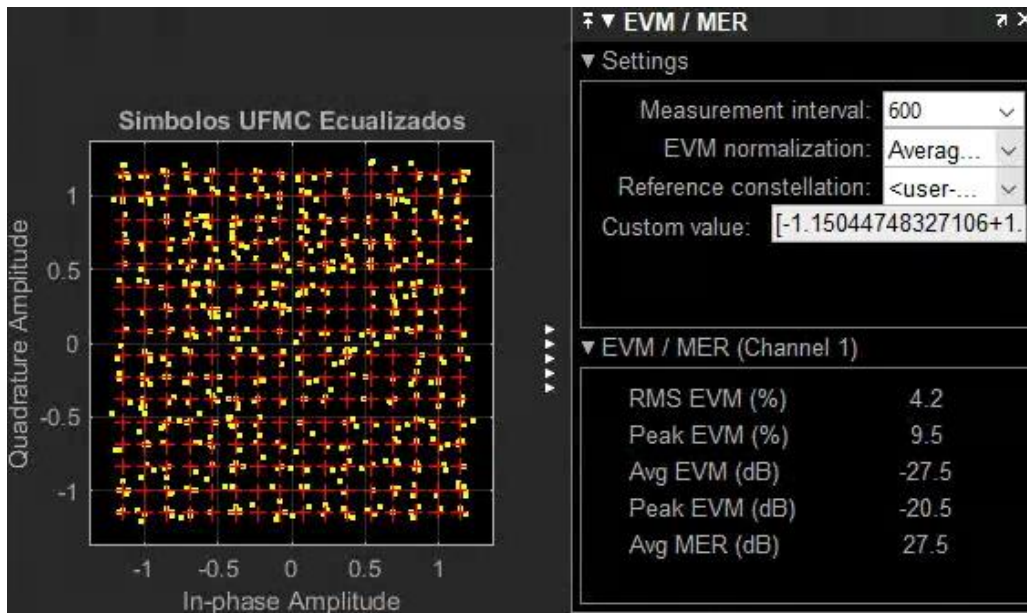


Gráfico 43. EVM de UF-OFDM/UFMC con 256 QAM.
Fuente autoría propia.

Sin embargo, si el esquema de modulación es menor el EVM mejora.

Así, si con F-OFDM se utiliza solamente QPSK se puede alcanzar un valor EVM de tan solo el 3.6%, como se puede observar en el Gráfico 44.

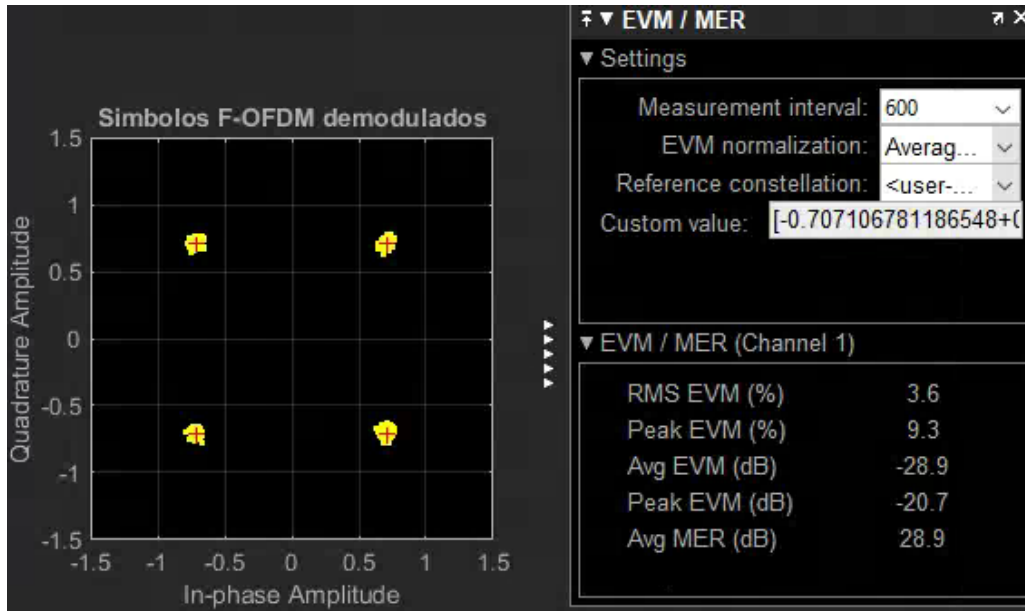


Gráfico 44. EVM de F-OFDM con QPSK.
Fuente: autoría propia.

En cambio, con QPSK y UF-OFDM el valor del EVM es de 4.2%, como se puede observar en el Gráfico 45.

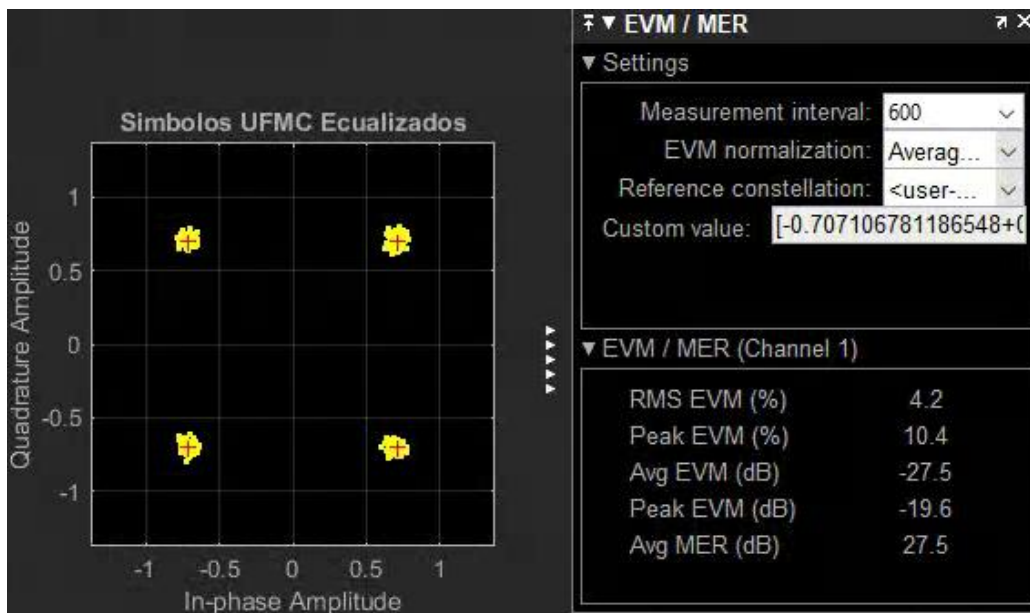


Gráfico 45. EVM de UF-OFDM/UFMC con QPSK.
Fuente: autoría propia.

A continuación, en la Tabla 2 se muestran los valores de EVM obtenidos en la simulación, para los diferentes esquemas de modulación utilizados.

*Tabla 2. Valores de EVM a diferentes órdenes de modulación.
Fuente: Autoría propia.*

Orden de modulación	EVM [%] para F-OFDM	EVM [%] para UF-OFDM
QPSK	3.6	4.2
16QAM	3.8	4.3
64QAM	3.7	4.3
256QAM	3.6	4.3

Es necesario considerar que mientras el orden de modulación sea más alto, si bien la densidad de transmisión y la eficiencia del canal se incrementan, los sistemas para su recepción son más complejos y la señal es mucho más sensible a la interferencia existente en el canal e inclusive al propio ruido generado en la circuitería. En consecuencia, el alcance es corto para mantener la eficiencia del sistema.

Un orden de modulación más bajo permite manejar tasas de EVM ligeramente mayores sin complicaciones y con sistemas menos complejos; la interferencia afecta menos a la transmisión y por tanto el alcance (distancia) de estas transmisiones es mayor.

Los valores de EVM presentados en la Tabla 2 son manejables por los sistemas disponibles al día de hoy.

6.4.4. BER

El BER nos da una rápida idea de la cantidad de errores del sistema de comunicaciones ya que cuantifica la cantidad bits erróneos en relación a la entrada del sistema.

En el argot común se dice que un valor de BER de 10^{-3} es manejable por los algoritmos o sistemas de corrección de errores. Es decir, que valores más altos darían problemas a las comunicaciones.

En la Tabla 3 se pueden observar los valores obtenidos a partir de nuestro modelo de simulación, para los diferentes órdenes de modulación y considerando una calidad de señal SNR de 25 dB.

*Tabla 3. BER para diferentes órdenes de modulación.
Fuente: Autoría propia.*

Orden de modulación	BER de F-OFDM	BER de UF-OFDM
PQSK	0	0
16QAM	0	0
64QAM	0	0
256QAM	0.00041667	0.0014583

El contenido de la Tabla 3 nos permite visualizar de forma rápida que un orden de modulación denso es más susceptible a sufrir errores en la transmisión, independientemente de las técnicas utilizadas. Así, una baja densidad de bits en la modulación digital es menos propensa a errores (BER) y por tanto, este tipo de señales se suelen utilizar en condiciones adversas del medio de transmisión. Los sistemas de comunicación actuales incluyen secciones que permiten adecuar el orden de modulación, por ejemplo, en función de la calidad de las señales, con la finalidad de minimizar la tasa de errores (BER) pero alcanzando las más altas tasas de transmisión posibles.

7. Conclusiones y Recomendaciones

- El estudio detallado de F-OFDM y UF-OFDM ha permitido conocer deficiencias en estas tecnologías. Por ejemplo, UF-OFDM se ve afectado en el BER con modulación de 256 QAM, y en el EVM para cualquier nivel de modulación. Es decir, F-OFDM presenta mejores resultados.
- En función de los resultados de la simulación, se puede evidenciar que el BER es más alto en 256 QAM, y se acentúa para el caso de UF-OFDM. Esto se puede considerar como una debilidad.
- La medida del vector de errores se ve afectada con órdenes de modulación altos. Esto se traduce como la presencia de errores en la transmisión.
- Dado que tanto F-OFDM como UF-OFDM agrupan y procesan un grupo de portadoras; el número que conforman estos grupos afectan directamente al BER de estos sistemas y por tanto debe ser cuidadosamente seleccionado.
- A partir de los resultados de la simulación realizada se puede afirmar que la calidad de la señal (SNR) influye directamente a F-OFDM y UF-OFDM pues, mientras menor calidad peores resultados de transmisión se obtienen.
- La característica de forma de onda flexible (ajustable) es deseada dado que las condiciones de transmisión varían en función de la distancia, tiempo, tipo de tráfico, entorno, etc.
- Finalmente, en las gráficas de PSD se puede apreciar que F-OFDM presenta un corte más pronunciado en los extremos de su espectro; es decir existe más atenuación de las bandas laterales, lo cual es equivalente a decir que permite tener mayor eficiencia espectral que UF-OFDM.
- Para futuros trabajos, será necesario complementar el modelo con sistemas de codificación polar, sistemas MIMO/MISO/SIMO, bandas manométricas. que son la tendencia para el 5G y otros sistemas de comunicaciones de alta capacidad.
- Definitivamente, el incremento de demanda de conectividad, propio de la masificación de la tecnología de internet, hará que sea necesario el constante esfuerzo para optimizar o definitivamente rediseñar los algoritmos y arquitecturas de telecomunicaciones, conforme se presenten las necesidades.

8. Bibliografía

- 3GPP. (2019). *LTE*. Retrieved from <https://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/98-lte>
- Ahmed, R., Schaich, F., & Wild, T. (2018). *OFDM Enhancements for 5G Based on Filtering and Windowing*. United States of America: Springer. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-319-92090-0_2
- BiBing. (2019, 12). *Modulación OFDM*. Retrieved from http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11244/fichero/Volumen+1%252F5_MODULACION_OFDM.pdf
- Chanclou, P., Neto, L. A., Grzybowski, K., Tayq, Z., Saliou, F., & Genay, N. (2018). Mobile Fronthaul Architecture and Technologies: A RAN Equipment Assessment . *Journal of Optical Communications and Networking*.
- GARTNER. (2018, Agosto). *Emerging technologies*. Retrieved from https://blogs.gartner.com/smarterwithgartner/files/2018/08/PR_490866_5_Trends_in_the_Emerging_Tech_Hype_Cycle_2018_Hype_Cycle.png
- Gartner. (2019, Julio 23). *Gartner Identifies the Top 10 Wireless Technology Trends for 2019 and Beyond*. Retrieved Agosto 13, 2019, from <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2019-07-23-gartner-identifies-the-top-10-wireless-technology-tre>
- Goztepe, C., & KarabulutKurt, G. (2018). The impact of out of band emissions: A measurement based performance comparison of UF-OFDM and CP-OFDM. *Science Direct*, 1.
- GSMA. (2019, Julio). *5G Spectrum*. Retrieved from <https://www.gsma.com/spectrum/wp-content/uploads/2019/09/5G-Spectrum-Positions.pdf>
- Hazareena, A., & Mustafa, B. A. (2018). A Survey:On the Waveforms for 5G. *IEEE*.
- Huawei Technologies Co., Ltd. (2018). *5G Spectrum*. Retrieved from https://www-file.huawei.com/-/media/corporate/pdf/public-policy/public_policy_position_5g_spectrum_2018.pdf?la=en
- Huawei Technologies Co., Ltd. (2019). *Up in the air with 5G*. Retrieved from <https://www.huawei.com/en/about-huawei/publications/communicate/80/up-in-the-air-with-5g>
- IET Digital Library. (2018, April 13). *3GPP Channel Model Developments for 5G NR Requirements and Testing*. Retrieved from <https://digital-library.theiet.org/content/conferences/10.1049/cp.2018.0877>
- Keysight. (2017, Noviembre 1). *Understanding the 5G NR Physical Layer*. Retrieved from http://www.sharetechnote.com/html/5G/5G_ResourceGrid.html
- Li, Y., Jing, L., Li, Z., & Murch, R. D. (2018). Subcarrier Delay Spread Based Adaptive OFDM for. *IEEE Transactions on Communications*, 2206-2218.

- Ligo Wave. (2019). *APC: Señal a ruido (SNR)*. Retrieved from <https://www.ligowave.com/wiki/es/faq/apc-senal-ruido-snr/>
- Mathematical description of OFDM*. (1999). Retrieved from <http://www.wirelesscommunication.nl/reference/chaptr05/ofdm/ofdmmath.htm>
- MathWorks. (2019). *F-OFDM vs. OFDM Modulation*. Retrieved from <https://www.mathworks.com/help/comm/examples/f-ofdm-vs-ofdm-modulation.html>
- MathWorks. (2019). *UFMC vs. OFDM Modulation*. Retrieved from <https://www.mathworks.com/help/comm/examples/f-ofdm-vs-ofdm-modulation.html>
- Mondal, B., Sergeev, V., Sengupta, A., & Davydov, A. (2018). 5G-NR (New Radio) CSI Computation Algorithm and Performance. *IEEE Xplore*.
- Nash, L. (2015). *Mobile radio propagation*. Retrieved from <https://slideplayer.com/slide/5668124/18/images/35/4.5.1+Frequency+Selective+Fading.jpg>
- NUTAQ. (2019). *An Introduction To Orthogonal Frequency Division Multiplex (OFDM)*. Retrieved Enero 2020, from <https://www.nutaq.com/blog/introduction-orthogonal-frequency-division-multiplex-ofdm>
- OCW. (2018). *Transformada de Fourier*. Retrieved from https://ocw.upc.edu/webs/42254/Acustica_ES/Bloc1/Hipertext/FFT.htm
- RF Page. (2018, Agosto 20). *What are 5G frequency bands*. Retrieved from <https://www.rfpage.com/what-are-5g-frequency-bands/>
- RF Wireless. (2012). *Inter Carrier Interference* . Retrieved from <https://www.rfwireless-world.com/Articles/Interference-basics-and-Interference-types.html>
- Share Tech Note. (2020). *5G - PHY Candidate* . Retrieved from UFMC (Universal Filtered Multi Carrier): http://www.sharetechnote.com/html/5G/5G_Phy_Candidate_UFMC.html
- Sharetechnote. (2019). *5G - PHY Candidate*. Retrieved from https://www.sharetechnote.com/html/5G/5G_Phy_Candidate_fOFDM.html
- Sharetechnote.com. (2016). *Fading_WavePath*. Retrieved from https://www.sharetechnote.com/image/Fading_WavePath.PNG
- SlidePlayer. (2019). *Protocolos de redes inalámbricas*. Retrieved from <https://slideplayer.es/slide/143438/>
- SPIRENT. (2018, Agosto). *Fading Basics* . Retrieved from https://www.spirent.cn/gui/~/_media/fc29acc7f9934903a6cf7dbc809249ae.ashx
- Telecomhall. (2014, Noviembre 18). *¿Qué es CP (Prefijo Cíclico) en LTE?* Retrieved from <http://www.telecomhall.com/es/que-es-cp-prefijo-ciclico-en-lte.aspx>

- Ullah Shah, S., Ashraf, M., Amin Khalil, R., Jan, T., Inayatullah Babar, M., Waqar Shah, S., & Ahmad, G. (2018). Implementing Enhanced MIMO with F-OFDM to Increase System Efficiency for Future 5G Cellular Networks. In I. J. Security (Ed.), *International Journal of Communication Networks and Information Security* (p. 7). IJCNIS. Retrieved from <https://pdfs.semanticscholar.org/1ac3/7e23218455b1ecdbb2c2b5eed62b15ce8861.pdf>
- windows.net. (2015). *Delay effects*. Retrieved from <https://portalvhds6615cqnrmf91.blob.core.windows.net/slides/634714334956562500.jpg>
- Yao, Z., Yuze, W., Haixuan, X., Browning, C., Barry, L. P., & Yu, Y. (2019). Experimental Demonstration of a WDM-RoF Based Mobile Fronthaul With f-OFDM Signals by Using Directly Modulated 3s-DBR Laser. *Lightwave Technology*, 3875-3881.
- Yousaf, F. Z., Bredel, M., & Schaller, S. (2018, Nov). *NFV and SDN-Key Technology Enablers for 5G Networks*. Retrieved from <http://adsabs.harvard.edu/abs/2018arXiv180607316Z>
- Borges, R. M., Pereira, L. A. M., Filgueiras, H. R. D., Ferreira, A. C., Seda, M. S. B., Neto, E. R., ... Cerqueira S. Jr, A. (2019). DSP-based Flexible-waveform and Multi-application 5G Fiber-Wireless System. *Journal of Lightwave Technology*, 8724(c), 1–1. <https://doi.org/10.1109/jlt.2019.2947916>
- Chen, L., & Yu, J. G. (2018). Interference cancellation scheme with variable bandwidth allocation for universal filtered multicarrier systems in 5G networks. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2018(1), 1–10. <https://doi.org/10.1186/s13638-017-1011-3>
- Cheng, X., He, Y., Ge, B., & He, C. (2016). A filtered OFDM using FIR filter based on window function method. *IEEE Vehicular Technology Conference, 2016-July*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/VTCSpring.2016.7504065>
- Demirors, E., Alba, G., Santagati, G. E., & Melodia, T. (2016). High data rate ultrasonic communications for wireless intra-body networks. *IEEE Workshop on Local and Metropolitan Area Networks, 2016-Augus(June)*. <https://doi.org/10.1109/LANMAN.2016.7548843>
- Farhang-Boroujeny, B., & Moradi, H. (2016). OFDM Inspired Waveforms for 5G. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 18(4), 2474–2492. <https://doi.org/10.1109/COMST.2016.2565566>
- Gerzaguet, R., Bartzoudis, N., Baltar, L. G., Berg, V., Doré, J. B., Kténas, D., ... Roth, K. (2017). The 5G candidate waveform race: a comparison of complexity and performance. *Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking*, 2017(1). <https://doi.org/10.1186/s13638-016-0792-0>
- Giordani, M., Polese, M., Mezzavilla, M., Rangan, S., & Zorzi, M. (2019). *Towards 6G Networks: Use Cases and Technologies*. 1–7. Retrieved from <http://arxiv.org/abs/1903.12216>

- Gonzaga Ferreira, M. V., Teles Vieira, F. H., Felix, J. P., De Souza, D. F., & Pereira Franco, R. A. (2018). Application of Evolutionary Algorithm to Allocate Resources in Wireless Networks with Carrier Aggregation. *2018 IEEE Congress on Evolutionary Computation, CEC 2018 - Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/CEC.2018.8477751>
- Guo, Q., Yuan, X., & Ping, L. (2007). MULTI-USER DETECTION TECHNIQUES FOR POTENTIAL 3GPP LONG TERM EVOLUTION (LTE) SCHEMES. *Multi-Carrier Spread Spectrum 2007*, (May). <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6129-5>
- Jayan, G., & Nair, A. K. (2018). Performance Analysis of Filtered OFDM for 5G. *2018 International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking, WiSPNET 2018*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/WiSPNET.2018.8538544>
- Ksentini, A. (2019). *Network Slicing*. (April), 1–1. <https://doi.org/10.1109/itslatam.2019.8721351>
- Lien, S. Y., Shieh, S. L., Huang, Y., Su, B., Hsu, Y. L., & Wei, H. Y. (2017). 5G New Radio: Waveform, Frame Structure, Multiple Access, and Initial Access. *IEEE Communications Magazine*, 55(6), 64–71. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1601107>
- Suárez, C. (2001). Modulación multiportadora OFDM. *Ingeniería (Bogotá)*, 6(2), 30–34. <https://doi.org/10.14483/23448393.2699>
- WANG, Z., Yu, G., Cheng, X., Yang, J., & Wang, Y. (2013). *Study on Simulation Performance of OFDM-IDMA System*. (Iccsee), 301–303. <https://doi.org/10.2991/iccsee.2013.77>
- Wild, T., & Schaich, F. (2015). A reduced complexity transmitter for UF-OFDM. *IEEE Vehicular Technology Conference*, 2015. <https://doi.org/10.1109/VTCSpring.2015.7145643>
- Wild, T., Schaich, F., & Chen, Y. (2014). 5G air interface design based on universal filtered (UF-)OFDM. *International Conference on Digital Signal Processing, DSP, 2014-Janua*(August), 699–704. <https://doi.org/10.1109/ICDSP.2014.6900754>
- Wu, D., Zhang, X., Qiu, J., Gu, L., Saito, Y., Benjebbour, A., & Kishiyama, Y. (2016). A field trial of f-OFDM toward 5G. *2016 IEEE Globecom Workshops, GC Wkshps 2016 - Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/GLOCOMW.2016.7848810>
- Yongxue, W., Sunan, W., & Weiqiang, W. (2019). Performance Analysis of the Universal Filtered Multi-Carrier (UFMC) Waveform for 5G System. *Journal of Physics: Conference Series*, 1169(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1169/1/012065>
- Zhang, X., Jia, M., Chen, L., Ma, J., & Qiu, J. (2015a). Filtered-OFDM - Enabler for flexible waveform in the 5th generation cellular networks. *2015 IEEE Global Communications Conference, GLOBECOM 2015*. <https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2014.7417854>
- Zhang, X., Jia, M., Chen, L., Ma, J., & Qiu, J. (2015b). Filtered-OFDM - Enabler for flexible waveform in the 5th generation cellular networks. *2015 IEEE Global Communications Conference, GLOBECOM 2015*. <https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2014.7417854>

9. Anexos

9.1. Anexo 1, código MatLab

```
%% Procesamiento de señales en OFDM, F-OFDM y UF-OFDM/UFMC
% Comparacion de los parametros PSD y EVM para F-OFDM y UF-OFDM/UFMC
%% Parametros de inicio
disp('*****');
disp('CARGANDO VARIABLES Y PARAMETROS DE INICIO');
clear all;
close all;
%s = rng(211);
%Parametros OFDM/F-OFDM
numFFT = 1024;
numRBs = 50;
rbSize = 12;
cpLen = 70; % (72 samples)CP lon samples
bitsPerSubCarrier = 8; % 2: QPSK, 4: 16QAM, 6: 64QAM, 8: 256QAM
snrdB = 25; % (18-30 dB)https://www.ligowave.com/wiki/es/faq/apc-senal-ruido-snr/
toneOffset = 2.5; % (2.5)Tone offset or excess bandwidth (in subcarriers)
L = 513; % Lon Filtro (=filterOrder+1)

gamMapper = comm.RectangularQAMModulator( ...
    'ModulationOrder', 2^bitsPerSubCarrier, 'BitInput', true, ...
    'NormalizationMethod', 'Average power'); % Mapeador QAM FOFDM/UFMC
BER = comm.ErrorRate; %Funcion BER
PAPR = comm.CCDF('PAPROutputPort', true, 'PowerUnits', 'dBW'); %Funcion PAPR
gamDemod = comm.RectangularQAMDemodulator('ModulationOrder', ...
    2^bitsPerSubCarrier, 'BitOutput', true, ...
    'NormalizationMethod', 'Average power'); % Demodulador QAM
numDataCarriers = numRBs*rbSize;

% Parametros UFMC
subbandSize = rbSize; % must be > 1
numSubbands = numRBs ; % numSubbands*subbandSize <= numFFT
subbandOffset = numFFT/2-subbandSize*numSubbands/2;
% Dolph-Chebyshev window design parameters
filterLen = cpLen;
slobeAtten = 40; % (40 dB)side-lobe atenuacion
prototypeFilter = chebwin(filterLen, slobeAtten);
fila=subbandSize*bitsPerSubCarrier;
columna=numSubbands;

%% Entrada datos
EntradaBinariaFOFDM = randi([0 1], bitsPerSubCarrier*numDataCarriers, 1);
symbolsIn = gamMapper(EntradaBinariaFOFDM);
offset = (numFFT-numDataCarriers)/2;
symbolsInOFDM = [zeros(offset,1); symbolsIn; ...
    zeros(numFFT-offset-numDataCarriers,1)];
ifftOut = ifft(ifftshift(symbolsInOFDM)); %empaquetado OFDM
txSigOFDM = [ifftOut(end-cpLen+1:end); ifftOut];

%% F-OFDM
switch bitsPerSubCarrier
    case 2 % QPSK
        disp('Analizando el orden de modulacion: QPSK');
        disp([num2str(bitsPerSubCarrier) ' bits por simbolo']);
    case 4 % 16QAM
        disp('Analizando el orden de modulacion: 16QAM');
        disp([num2str(bitsPerSubCarrier) ' bits por simbolo']);
    case 6 % 64QAM
        disp('Analizando el orden de modulacion: 64QAM');
        disp([num2str(bitsPerSubCarrier) ' bits por simbolo']);
    case 8 % 256QAM
        disp('Analizando el orden de modulacion: 256QAM');
        disp([num2str(bitsPerSubCarrier) ' bits por simbolo']);
end
halfFilt = floor(L/2);
n = -halfFilt:halfFilt;
pb = sinc((numDataCarriers+2*toneOffset).*n./numFFT); % Filtro de funcion SINC
w = (0.5*(1+cos(2*pi.*n/(L-1)))).^0.6; % Ventana SINC
fnum = (pb.*w)/sum(pb.*w); % coeficientes normalizados
filtTx = dsp.FIRFilter('Structure', 'Direct form symmetric', ...
```

```

    'Numerator', fnum); % Filtro FIR
    filtRx = clone(filtTx);
    figure('Name','PSD');
    subplot(3,1,2);
    axis([-0.5 0.5 -200 -20]);
    hold on;
    grid on;
    xlabel('Frecuencia Normalizada');
    ylabel('PSD (dBW/Hz)')
    title(['F-OFDM, ' num2str(numRBs) ' Resource Blocks, ' ...
          num2str(rbSize) ' con Sub-carriers cada una'])
    % AQUI ENTRADA BINARIA
    txSigFOFDM = filtTx([txSigOFDM; zeros(L-1,1)]); %señal FOFDM a transmitir
    [psd,f] = periodogram(txSigFOFDM, rectwin(length(txSigFOFDM)), ...
                          numFFT*2, 1, 'centered');
    plot(f,10*log10(psd)); % PSD de FOFDM

%%AQUI OFDM
rxSig = awgn(txSigFOFDM, snrdB, 'measured'); %agregacion de ruido
rxSigFilt = filtRx(rxSig);
rxSigFiltSync = rxSigFilt(L:end);
rxSymbol = rxSigFiltSync(cpLen+1:end);
RxSymbols = fftshift(fft(rxSymbol));
dataRxSymbols = RxSymbols(offset+(1:numDataCarriers));
switch bitsPerSubCarrier
    case 2 % QPSK
        refConst = qammod((0:3).', 4, 'UnitAveragePower', true);
    case 4 % 16QAM
        refConst = qammod((0:15).', 16, 'UnitAveragePower', true);
    case 6 % 64QAM
        refConst = qammod((0:63).', 64, 'UnitAveragePower', true);
    case 8 % 256QAM
        refConst = qammod((0:255).', 256, 'UnitAveragePower', true);
end
constDiagRxFOFDM = comm.ConstellationDiagram( ...
    'ShowReferenceConstellation', true, ...
    'ReferenceConstellation', refConst, ...
    'Position', figposition([5 15 25 40]), ...
    'EnableMeasurements', true, ...
    'MeasurementInterval', length(dataRxSymbols), ...
    'Title', 'Simbolos F-OFDM demodulados', ...
    'Name', 'Recepcion F-OFDM', ...
    'XLimits', [-1.5 1.5], 'YLimits', [-1.5 1.5]);
constDiagRxFOFDM(dataRxSymbols);
FOFDMrxBits = qamDemod(dataRxSymbols);
ber = BER(EntradaBinariaFOFDM, FOFDMrxBits); %BER de FOFDM
disp(['Recpcion F-OFDM, BER = ' num2str(ber(1)) ' con SNR = ' ...
      num2str(snrdB) ' [dB]']);
%% OFDM
[psd,f] = periodogram(txSigOFDM, rectwin(length(txSigOFDM)), numFFT*2, ...
                      1, 'centered');
subplot(3,1,1);
plot(f,10*log10(psd)); %PSD de OFDM
grid on;
axis([-0.5 0.5 -100 -20]);
xlabel('Frecuencia Normalizada');
ylabel('PSD [dBW/Hz]')
title(['OFDM, ' num2str(numRBs*rbSize) ' Subcarriers'])

%% UF-OFDM/UFMC
EntradaBinariaUFMC=reshape(EntradaBinariaFOFDM,filas,columna);
txSig = complex(zeros(numFFT+filterLen-1, 1));
subplot(3,1,3);
axis([-0.5 0.5 -100 20]);
hold on;
grid on;
xlabel('Frecuencia Normalizada');
ylabel('PSD [dBW/Hz]')
title(['UFMC, ' num2str(numSubbands) ' Sub-bandas, ' ...
      num2str(subbandSize) ' con Sub-portadoras cada una'])
for bandIdx = 1:numSubbands
    bitsIn=EntradaBinariaUFMC(:,bandIdx);
    symbolsIn = qamMapper(bitsIn);
    offset = subbandOffset+(bandIdx-1)*subbandSize; %Empaquetado OFDM
    symbolsInOFDM = [zeros(offset,1); symbolsIn; ...

```

```

        zeros(numFFT-offset-subbandSize, 1]);
    ifftOut = ifft(iffshift(symbolsInOFDM));
    bandFilter = prototypeFilter.*exp(1i*2*pi*(0:filterLen-1)/numFFT* ...
        ((bandIdx-1/2)*subbandSize+0.5+subbandOffset+numFFT/2));
    filterOut = conv(bandFilter,ifftOut); %Aplicacion del filtro
    [psd,f] = periodogram(filterOut, rectwin(length(filterOut)), ...
        numFFT*2, 1, 'centered');
    plot(f,10*log10(psd)); %PSD de UPMC
    txSig = txSig + filterOut;
end
hold off;

rxSig = awgn(txSig, snrdB, 'measured'); %Agregacion de ruido
yRxPadded = [rxSig; zeros(2*numFFT-numel(txSig),1)];
RxSymbols2x = fftshift(fft(yRxPadded));
RxSymbols = RxSymbols2x(1:2:end);
dataRxSymbols = RxSymbols(subbandOffset+(1:numSubbands*subbandSize));
rxf = [prototypeFilter.*exp(1i*2*pi*0.5*(0:filterLen-1)/numFFT); ...
    zeros(numFFT-filterLen,1)]; %Ecuacion y filtrado
prototypeFilterFreq = fftshift(fft(rxf));
prototypeFilterInv = 1./prototypeFilterFreq(numFFT/2-subbandSize/2+(1:subbandSize));
dataRxSymbolsMat = reshape(dataRxSymbols,subbandSize,numSubbands);
EqualizedRxSymbolsMat = bsxfun(@times,dataRxSymbolsMat,prototypeFilterInv);
EqualizedRxSymbols = EqualizedRxSymbolsMat(:); %Simbolos ecualizados
switch bitsPerSubCarrier
    case 2 % QPSK
        refConst = qammod((0:3).', 4, 'UnitAveragePower', true);
    case 4 % 16QAM
        refConst = qammod((0:15).', 16, 'UnitAveragePower', true);
    case 6 % 64QAM
        refConst = qammod((0:63).', 64, 'UnitAveragePower', true);
    case 8 % 256QAM
        refConst = qammod((0:255).', 256, 'UnitAveragePower', true);
end
constDiagEqUPMC = comm.ConstellationDiagram('ShowReferenceConstellation', ...
    true, 'Position', figposition([46 15 25 40]), ...
    'ReferenceConstellation', refConst, ...
    'EnableMeasurements', true, ...
    'MeasurementInterval', length(dataRxSymbols), ...
    'Title', 'Simbolos UPMC Ecualizados', ...
    'Name', 'Ecualizacion UPMC');
constDiagEqUPMC(EqualizedRxSymbols);
rxBits = qamDemod(EqualizedRxSymbols);
ber = BER(EntradaBinariaUPMC(:), rxBits);
disp(['Recepcion UPMC, BER = ' num2str(ber(1)) ' con SNR = ' ...
    num2str(snrdB) ' dB']);
%% FIN
%rng(s);
disp('*****');
disp('FIN DEL ANALISIS');
disp('*****');

```

9.2. Anexo 2, entorno de simulación

