

Proyecto Fin de Carrera

Ingeniería de Telecomunicación

Estudio de formas de onda candidatas para 5G: Caso UFMC

Autor: Gonzalo José García Japón

Tutora: María José Madero Ayora

Dpto. Teoría de la Señal y Comunicaciones
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019



Proyecto Fin de Carrera
Ingeniería de Telecomunicación

Estudio de formas de onda candidatas para 5G: Caso UFMC

Autor:

Gonzalo José García Japón

Tutora:

María José Madero Ayora

Profesora titular

Dpto. de Teoría de la Señal y Comunicaciones

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019

Proyecto Fin de Carrera: Estudio de formas de onda candidatas para 5G: Caso UPMC

Autor: Gonzalo José García Japón

Tutora: María José Madero Ayora

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2019

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis amigos

A mis profesores

A mi pareja

Agradecimientos

Tras cuatro años en la escuela, con este trabajo finaliza una de las etapas más apasionantes de mi vida. En la universidad he conocido compañeros que se han convertido en grandes amigos para toda la vida, y a los que agradezco por haberme acompañado durante estos años. Mención especial a Tere, por todos los apuntes que me pasó y por su compañía sin los cuales no hubiera podido acabar. Dar las gracias a mi familia por permitirme poder realizar esta carrera y por apoyarme a lo largo de ella. Agradecer también la ayuda y el gran esfuerzo de María José tanto en las clases como en la realización de este trabajo, y por permitirme y ayudarme a iniciarme en el mundo de la investigación. Por último, dar las gracias a mi mayor apoyo de mi vida para todo, mi pareja Paula. Llegaste en el momento justo, y me diste fuerzas para poder cerrar esta fase y empezar una nueva.

Una nueva generación de comunicaciones móviles está próxima y con ella nuevos y mejores servicios para todos los usuarios. La quinta generación (5G) promete ofrecer un nuevo mundo de posibilidades tecnológicas en numerosos ámbitos.

Se espera que 5G empiece a desplegarse de forma comercial en 2020, aunque determinadas empresas ya empiezan a ofrecer parte de sus servicios.

Esta revolución tecnológica ha sido increíblemente rápida y se ha sucedido casi sin darnos cuenta. Es por ello por lo que aún quedan cuestiones importantes que abordar antes de una implementación global de 5G.

Este trabajo trata de analizar una de estas cuestiones, qué forma de onda utilizar en la capa física de los nuevos protocolos para 5G. Actualmente existen tres formas de onda favoritas para este cometido: GFDM, FBMC y UFMC.

En el desarrollo del trabajo se analizarán todas ellas y se implementará de forma teórica y real una señal UFMC. Este análisis nos permitirá sacar conclusiones sobre qué camino escoger en el futuro y sobre las mejoras que pueden ofrecer estas formas de onda frente a OFDM.

Abstract

A new generation of mobile communications is coming and with it new and better services for all users. The fifth generation (5G) promises to offer a new world of technological possibilities in many areas.

It is expected that 5G will begin to be commercially deployed in 2020, although certain companies are already starting to offer part of their services.

This technological revolution has been incredibly fast and has happened almost without realizing it. That is why there are still important issues to address before a global implementation of 5G.

This paper tries to analyze one of these questions, which waveform to use in the physical layer of the new protocols for 5G. Currently, there are three favorite waveforms for this task: GFDM, FBMC and UFMC.

In the development of the work all of them will be analyzed and a UFMC signal will be implemented in a theoretical and real way. This analysis will allow us to draw conclusions on what path to choose in the future and on the improvements that these waveforms can offer against OFDM.

Índice

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xv
Índice de Tablas	xvii
Índice de Figuras	xix
1 Introducción	1
1.1 Estructura	1
1.2 Objetivos	1
2 Material y método	3
3 Evolución de las Comunicaciones Móviles	5
3.1 Primera generación (1G)	5
3.2 Segunda generación (2G)	7
3.2.1 GPRS y EDGE (2.5G - 2.75G)	8
3.3 Tercera generación (3G)	8
3.3.1 HSDPA, HSUPA y HSPA+ (Beyond 3G)	10
3.4 Cuarta generación (4G)	10
3.5 Quinta generación (5G)	12
3.5.1 Usos, servicios y escenarios de 5G	14
3.5.2 Requisitos y capacidades de 5G	15
3.5.3 5G New Radio (3GPP releases 15 y 16)	17
4 Forma de Onda de 4G y 5G-NR: OFDM	19
4.1 OFDM	19
4.2 Capa física de LTE (4G)	21
4.2.1 OFDMA	21
4.2.2 SC-FDMA	21
4.3 Capa física de 5G-NR	21
4.3.1 Forma de onda, numerología y estructura de la trama	22
4.4 Forma de onda para 5G	25
4.4.1 Ventajas e inconvenientes de OFDM	25
4.4.2 Principios generales de diseño para la capa PHY / MAC de 5G	30
5 Formas de onda candidatas para 5G	31
5.1 Formas de onda candidatas derivadas de OFDM	31
5.1.1 GFDM	31
5.1.2 FBMC	34
5.2 Universal Filtered MultiCarrier (UFMC)	37
5.2.1 Transmisor	38
5.2.2 Receptor	40
5.2.3 Características de UFMC	41

5.3	<i>Comparación de UPMC con OFDM</i>	43
6	Resultados experimentales	47
6.1	<i>Escenario y parámetros de las medidas</i>	47
6.2	<i>Señales generadas</i>	48
6.2.1	Señales con formato 1	49
6.2.2	Señales con formato 2	50
6.2.3	Señales con formato 3	51
6.3	<i>Resultados obtenidos en el laboratorio</i>	52
6.3.1	Señales con formato 1	53
6.3.2	Señales con formato 2	55
6.3.3	Señales con formato 3	57
6.4	<i>Conclusión de los resultados</i>	59
7	Conclusiones y trabajo futuro	61
	Anexo A	63
	Anexo B	75
	Referencias	95

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1 Parámetros técnicos de los estándares de comunicación celular analógica	7
Tabla 3-2 Clasificación de servicios UMTS	9
Tabla 4-1 Valores de SCS en 5G-NR	22
Tabla 4-2 Parámetros principales de la capa física de 5G-NR	23
Tabla 4-3 Parámetros de la trama de 5G NR	23
Tabla 6-1 Parámetros de las señales generadas	47
Tabla 6-2 Formatos de las señales generadas	48
Tabla 6-3 PAPR señales formato 1	50
Tabla 6-4 PAPR señales formato 2	50
Tabla 6-5 PAPR señales formato 3	52
Tabla 6-6 Datos obtenidos de las señales reales con formato 1	53
Tabla 6-7 Datos obtenidos de las señales reales con formato 2	55
Tabla 6-8 Datos obtenidos de las señales reales con formato 3	57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Analizador vectorial de señal N9030 PXA	3
Figura 2-2 Generador vectorial de señales SMU 200A	3
Figura 2-3 Esquema del procedimiento seguido durante el trabajo para medir una señal	4
Figura 3-1 Características y evolución de las redes móviles.	5
Figura 3-2 Mediciones del tráfico de voz y datos en redes de telecomunicaciones móviles en todo el mundo, en el período comprendido entre enero de 2007 y julio de 2011. Fuente: Ericsson	10
Figura 3-3 Cronología de la evolución de LTE	11
Figura 3-4 Estimación del tráfico móvil global en 2020-2030 (tráfico M2M incluido, 1 EB = 10^{18} bytes)	13
Figura 3-5 Escenarios de uso de 5G definidos por el IMT-2020	14
Figura 3-6 Importancia de capacidades clave en los diferentes escenarios de uso	15
Figura 3-7 Objetivos de rendimiento de 5G	16
Figura 3-8 Mejora de capacidades clave de IMT-Advanced a IMT-2020	16
Figura 3-9 3GPP 5G estándares en el tiempo	17
Figura 4-1 Espectro OFDM para 7 subportadoras	19
Figura 4-2 Esquema Tx/Rx de una señal OFDM	20
Figura 4-3 Esquema de un transmisor SC-FDMA utilizado en <i>uplink</i> en LTE	21
Figura 4-4 Ejemplo de numerología con CP normal	24
Figura 4-5 Ejemplpo de trama para $\mu = 4$	24
Figura 4-6 Ejemplo de escenarios de uso para 5G-NR con diferentes configuraciones de parámetros de la capa física	25
Figura 4-7 Representación de la eficiencia espectral de OFDM	26
Figura 4-8 Esquema de un símbolo OFDM con CP en el dominio del tiempo	26
Figura 4-9 Esquema del problema de ICI en OFDM	27
Figura 4-10 Esquema del problema de ISI en OFDM	27
Figura 4-11 Tramas OFDM en el receptor con CP	28
Figura 4-12 Tiempo de guarda y tiempo útil de un símbolo OFDM con CP	28
Figura 4-13 Espectro de potencia de señal de enlace descendente LTE de 20 MHz	29
Figura 5-1 Modulador GFDM	32
Figura 5-2 Comparación bloques de recursos de OFDM y GFDM	32
Figura 5-3 Espectros GFDM, GS-GFDM y OFDM obtenidos en simulación.	33
Figura 5-4 Banco de filtros en frecuencia para FBMC	34
Figura 5-5 Muestras del filtro prototipo $p(t)$ en en dominio de la frecuencia	34
Figura 5-6 Quadrature Amplitude Modulation (QAM) vs Offset QAM (O-QAM).	35
Figura 5-7 Espectro de FMBC respecto al de OFDM	36
Figura 5-8 Banco de filtros en frecuencia para UFMC	37

Figura 5-9 Diagrama de bloques de un transceptor UFMC	37
Figura 5-10 Espectro de una señal UFMC software con 15 subbandas	42
Figura 5-11 Parte real de $x(t)$ de una señal UFMC con 10 subbandas.	43
Figura 5-12 Espectros de una señal UFMC con 10 subbandas (rojo) y una señal OFDM 5G NR (azul) medidas en el laboratorio	44
Figura 5-13 Trenes de símbolos de CP-OFDM (arriba) y UFMC (abajo), ejemplificados por una única subportadora (parte real). Zonas azul claro: CP y rampas de filtro, respectivamente. Zonas naranja claro: parte portadora de datos	45
Figura 6-1 Escenario lineal donde se realizaron las medidas	48
Figura 6-2 Espectros de UFMC 1-10 y OFDM 1 software sin sobremuestreo	49
Figura 6-3 Espectros de UFMC 1-10 y OFDM 1 software con sobremuestreo	49
Figura 6-4 Espectros de UFMC 2-10 y OFDM 2 software sin sobremuestreo	50
Figura 6-5 Espectros de UFMC 2-10 y OFDM 2 software con sobremuestreo	51
Figura 6-6 Espectros de UFMC 3-15 y OFDM 3 software sin sobremuestreo	51
Figura 6-7 Espectros de UFMC 3-15 y OFDM 3 software con sobremuestreo	52
Figura 6-8 Espectros de UFMC 1-10 y OFDM 1 medidas en el laboratorio con sobremuestreo	53
Figura 6-9 Espectro de la señal UFMC 1-10 software (rojo), medida en el laboratorio (azul) y el error entre ambas (azul discontinuo)	54
Figura 6-10 Constelación símbolos QAM de la señal demodulada UFMC 1-10 medida en el laboratorio	54
Figura 6-11 Espectros de UFMC 2-10 y OFDM 2 medidas en el laboratorio con sobremuestreo	55
Figura 6-12 Espectro de la señal UFMC 2-10 software (rojo), medida en el laboratorio (azul) y el error entre ambas (azul discontinuo)	56
Figura 6-13 Constelación símbolos QAM de la señal demodulada UFMC 2-10 medida en el laboratorio	56
Figura 6-14 Espectros de UFMC 3-15 y OFDM 3 medidas en el laboratorio con sobremuestreo	57
Figura 6-15 Espectro de la señal UFMC 3-15 software (rojo), medida en el laboratorio (azul) y el error entre ambas (azul discontinuo)	58
Figura 6-16 Constelación símbolos QAM de la señal demodulada UFMC 3-15 medida en el laboratorio	58
Figura 6-17 Parte real de las señales UFMC 1-10 y una OFDM 1 en el dominio del tiempo	59
Figura B-1 OFDM con formato 2	75
Figura B-2 OFDM con formato 1	75
Figura B-3 OFDM con formato 3	76
Figura B-4 UFMC 1-1	76
Figura B-5 UFMC 1-5	77
Figura B-6 UFMC 1-10	77
Figura B-7 UFMC 1-15	78
Figura B-8 UFMC 1-30	78
Figura B-9 UFMC 1-300	79
Figura B-10 UFMC 2-1	79
Figura B-11 UFMC 2-5	80
Figura B-12 UFMC 2-10	80
Figura B-13 UFMC 2-15	81

Figura B-14 UFMC 2-30	81
Figura B-15 UFMC 2-300	82
Figura B-16 UFMC 3-1	82
Figura B-17 UFMC 3-5	83
Figura B-18 UFMC 3-10	83
Figura B-19 UFMC 3-15	84
Figura B-20 UFMC 3-30	84
Figura B-21 UFMC 3-300	85
Figura B-22 UFMC 3-900	85
Figura B-23 Constelación UFMC 1-1	86
Figura B-24 Constelación UFMC 1-5	86
Figura B-25 Constelación UFMC 1-15	87
Figura B-26 Constelación UFMC 1-30	87
Figura B-27 Constelación UFMC 1-300	88
Figura B-28 Constelación UFMC 2-1	88
Figura B-29 Constelación UFMC 2-5	89
Figura B-30 Constelación UFMC 2-15	89
Figura B-31 Constelación UFMC 2-30	90
Figura B-32 Constelación UFMC 2-300	90
Figura B-33 Constelación UFMC 3-1	91
Figura B-34 Constelación UFMC 3-5	91
Figura B-35 Constelación UFMC 3-10	92
Figura B-36 Constelación UFMC 3-30	92
Figura B-37 Constelación UFMC 3-300	93
Figura B-38 Constelación UFMC 3-900	93

1 INTRODUCCIÓN

Nos encontramos ante las puertas de la cuarta revolución industrial y tecnológica, una revolución que evoluciona a pasos agigantados y de forma exponencial. Y una parte fundamental dentro de esta revolución la forman las comunicaciones móviles cuya tecnología, objetivos y número de usuarios también aumentan de forma vertiginosa.

En este contexto está por surgir la nueva generación de comunicaciones móviles: 5G. 5G aspira a aportar mayores velocidades de descarga de datos, mayor número de usuarios y dispositivos conectados e incluso aspectos que nos resultan tan futuristas como el coche autónomo.

Este trabajo pretende ahondar en la necesidad de esta nueva generación de comunicaciones móviles y el estudio de nuevas formas de onda candidatas para su capa física, así como en las características y posibilidades que 5G podrá ofrecernos.

1.1 Estructura

El trabajo se desarrollará en 6 capítulos además de este. El segundo capítulo tratará el material y método utilizado para la realización del trabajo.

Posteriormente se hace una introducción histórica y teórica sobre las comunicaciones móviles desde su aparición hasta nuestros días y la forma de onda utilizada a día de hoy en 4G. Esto último ocupa los capítulos 3 y 4 respectivamente, donde también se procede a examinar las ventajas e inconvenientes de OFDM para 5G.

A continuación, el capítulo 5 describe con detalle de forma teórica las nuevas formas de onda candidatas para la quinta generación, centrándonos en el tema principal de este trabajo: UFMC.

Por último, en los capítulos 6 y 7 se recogen los resultados obtenidos tanto en la simulación de las señales como en las medidas de las señales reales en el laboratorio y se extraen las conclusiones de estos resultados.

1.2 Objetivos

El objetivo principal del trabajo es estudiar las formas de onda candidatas para la quinta generación y extraer sus características, diferencias y mejoras respecto OFDM. El estudio se centrará en las formas de onda candidatas más populares: GFDM, FBMC, UFMC.

Aunque el estudio teórico se realizará para las tres formas de onda mencionadas anteriormente, se intentará implementar un transmisor/receptor UFMC mediante la herramienta software MATLAB. De esta forma tendremos un estudio más detallado de esta forma de onda.

Finalmente, si la implementación software funciona correctamente, se procederá a generar una señal real a partir de la señal software en el laboratorio. Esta señal se medirá en un analizador vectorial de señales y se volverá a digitalizar para realizar un análisis de su rendimiento y sus características en una implementación real.

Al final del trabajo se espera obtener una comparación del rendimiento ofrecido por UFMC respecto a OFDM tanto teórico como a nivel de implementación real en equipos de laboratorio. Este análisis permitirá extraer nuevas conclusiones sobre qué forma de onda desarrollar para 5G.

2 MATERIAL Y MÉTODO

Este trabajo puede dividirse en tres partes, una primera fase de investigación bibliográfica y teórica, una segunda de implementación en MATLAB de las señales software y, por último, una fase experimental en el laboratorio midiendo estas señales. En la Figura 2-3 se puede observar una imagen que describe el proceso seguido para realizar el trabajo.

Se ha realizado un estudio teórico de las señales propuestas para las comunicaciones móviles de 5G, para centrarnos después en un mayor desarrollo y posterior implementación de la forma de onda UFMC.

Una vez analizada teóricamente UFMC se implementó un transmisor/receptor en la herramienta de desarrollo software MATLAB.

Seguidamente se traslada la investigación al laboratorio para crear y medir señales reales de UFMC en función de las generadas en MATLAB.

Los equipos utilizados en el laboratorio se muestran en las Figuras 2-1 y 2-2 a continuación:

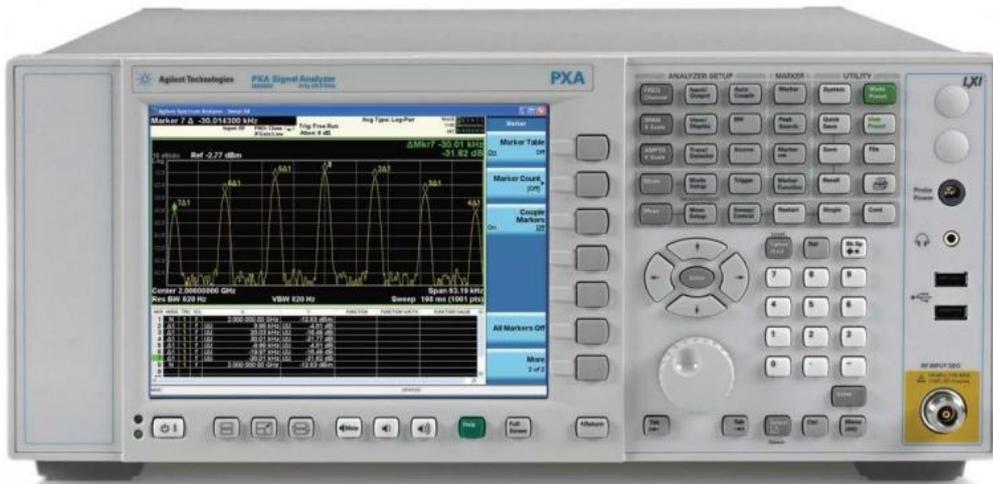


Figura 2-1 Analizador vectorial de señal N9030 PXA

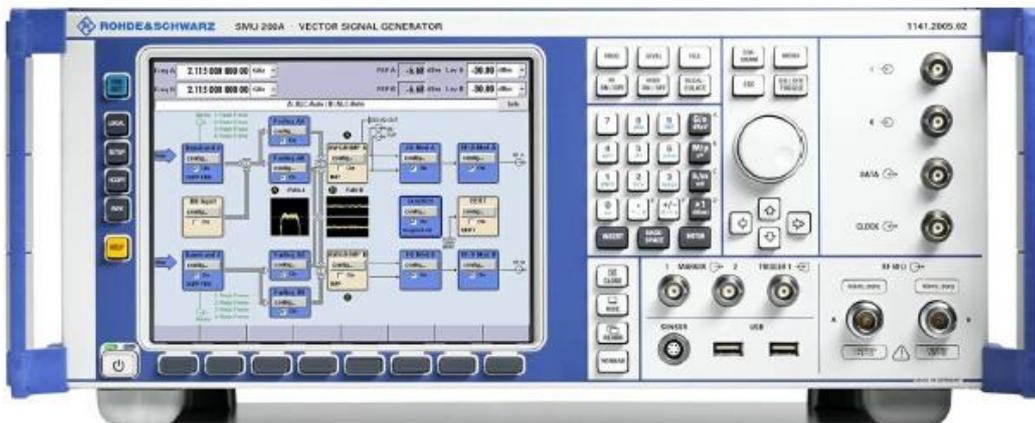


Figura 2-2 Generador vectorial de señales SMU 200A

El generador de señales nos permite cargar la envolvente compleja de la señal generada en MATLAB y modular una portadora, dando lugar a una señal real modulada con la forma de UFMC a partir de esto. La señal UFMC

se hace llegar hasta el analizador vectorial de señal para medirla. Este analizador nos permite ver el espectro de la señal con su modo de analizador de espectros y, además, nos permite capturar muestras en el tiempo de su envolvente compleja.

La envolvente compleja de la señal real se puede pasar de nuevo a MATLAB para ser analizada y postprocesada.

Finalmente, con las señales ideales y las reales, y añadiendo el análisis software que se les ha realizado, se sacarán las conclusiones del trabajo.

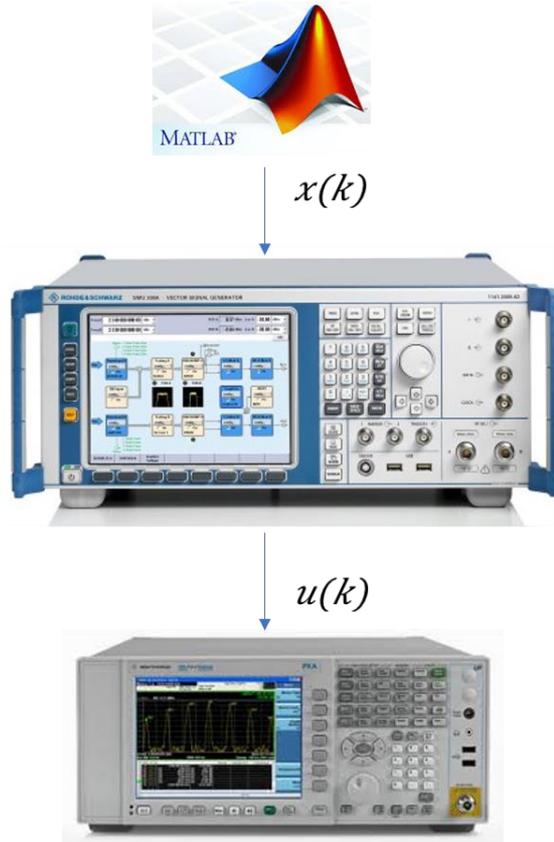


Figura 2-3 Esquema del procedimiento seguido durante el trabajo para medir una señal

3 EVOLUCIÓN DE LAS COMUNICACIONES MÓVILES

Las comunicaciones móviles se encuentran en un progreso continuo desde que en los años setenta surgiera la primera red de comunicaciones móviles. Desde entonces la demanda de servicios ha ido creciendo exponencialmente, obligando a evolucionar y mejorar estas redes. Las diferentes etapas tecnológicas y sus correspondientes estándares se conocen como “generaciones”. El objetivo de este capítulo es hacer un repaso a lo largo de las 4 generaciones que han existido (4G es la actual) para poner en contexto la nueva generación 5G que se espera esté en funcionamiento en un futuro cercano.

Durante el capítulo trataremos de hacer hincapié en las capas físicas de cada una de las generaciones y las necesidades de los usuarios para entender los avances que se producen de una generación a otra. Para el caso de 4G dedicaremos posteriormente un capítulo que nos permita entender la necesidad de un cambio en la capa física para poder cubrir todos los servicios que pretende ofrecer 5G.

En la figura 3-1 se muestra un resumen cronológico de las redes móviles que explicaremos con más detalle a lo largo del capítulo:



Figura 3-1 Características y evolución de las redes móviles.

3.1 Primera generación (1G)

Forman parte de la primera generación de redes móviles todos aquellos estándares que utilizaban una comunicación totalmente analógica mediante señales de radio. Esta tecnología fue la primera capaz de establecer una comunicación entre usuarios en movimiento, introduciendo así el concepto de movilidad en las comunicaciones. La primera generación se dio entre los años 1970-1980 extendiéndose hasta los noventa donde empezó a caer en desuso.

Las características principales de esta generación son las siguientes:

- Las señales transmitidas son analógicas.
- Solo se podía transmitir voz.
- Grandes problemas de seguridad. Señales de voz fácilmente intercetables o incluso uso de las frecuencias cobrando el servicio a otros usuarios.
- Cobertura muy limitada (local o regional).
- Conmutación de circuitos y acceso al canal mediante FDMA.
- Red celular interconectada, donde cada célula daba cobertura a los usuarios que se encontraban en un radio de hasta 20 km.

Entre los estándares más utilizados se encuentra NMT (*Nordic Mobile Telephone*). Este sistema operaba en países nórdicos como Finlandia, Dinamarca o Noruega, pero consiguió extenderse más allá de estos países. Existen dos estándares dentro de NMT, uno trabaja a frecuencias de 463.0-467.5 MHz para el enlace descendente y 453.0-457.5 MHz para el ascendente (NMT-450). Mientras que NMT-900 utiliza la banda de frecuencias entre 890-915 MHz para transmitir. Ambos utilizan un canal de 25 kHz de ancho y una modulación FSK.

El sistema empleado en Estados Unidos era el AMPS (*Advanced Mobile Phone System*) elaborado por laboratorios Bell en 1980 y que ofrecía una cobertura nacional. AMPS consta de 832 canales dúplex (ascendente-descendente) con canales de 30 kHz en la banda de los 800-900 MHz.

Se introduce también con AMPS el concepto de “Handover”, consistente encambiar de una celda de cobertura a otra cuando los niveles de señal (y la configuración de los equipos) así lo exijan [1]. Este estándar fue tomado como referencia en Reino Unido para crear TACS (*Total Access Communication System*) y E-TACS (*Extended Total Access Communication System*) que se instauró en España y el resto de Europa.

En España se implantaron en 1982 el TMA-450 de Telefónica basado en NMT y en 1990 el TMA-900 de Telefónica basado en TACS con el nombre comercial de MoviLine.

Otros estándares implantados fueron en Francia el sistema Radiocom 2000, en Alemania la red C (C-Netz) desde 1986 y en Italia en 1983 el sistema RTMS (*Radio Telephone Mobile System*).

La empresa japonesa NTT desarrolló también un estándar llamado Hicap que fue el primero en realizar una operación a nivel mundial. Utilizaba FDMA a frecuencias de unos 800 MHz y con portadoras de 25 kHz.

El gran inconveniente de 1G era que toda la tecnología era analógica y por tanto la calidad y seguridad del servicio era muy baja. Al no estar digitalizada la señal no se podían emplear códigos de corrección que mejoraran la calidad de esta. Asimismo, la utilización del espectro al reservar los canales, aunque finalmente no fueran usados, era muy ineficiente.

La gran necesidad de un estándar común y único dentro de las comunicaciones móviles, el aumento de la demanda de este servicio y la creación de nuevos, además de las desventajas que se han comentado anteriormente provocaron el surgimiento de la segunda generación.

Tabla 3-1 Parámetros técnicos de los estándares de comunicación celular analógica

	NMT 450	NMT 900	AMPS	TACS	C 450	Radiocom 2000	NTT
País de origen	Escandinavia	Escandinavia	Estados Unidos	Reino Unido	Alemania	Francia	Japón
Año primera red comercial	1981	1986	1983	1985	1986	1981	1979
Frecuencia de transmisión del terminal	450 MHz	890 MHz	824-849 MHz	890-915 MHz	461-465 MHz	400-427 MHz	860-885 MHz
Frecuencia de transmisión de la estación base	460 MHz	935 MHz	869-894 MHz	935-960 MHz	451-455 MHz	900 MHz	915-940 MHz
Ancho del canal	25 kHz	12,5 kHz	30 kHz (10 kHz en N-AMPS)	25 kHz	20 kHz	12,5 kHz	25 kHz

3.2 Segunda generación (2G)

El mayor avance de la segunda generación respecto a la primera es el paso de analógico a digital mediante la implementación de varios protocolos. Estos protocolos también mejoraron el manejo de llamadas, más enlaces simultáneos en el mismo ancho de banda y la integración de otros servicios adicionales al de la voz, como por ejemplo la identificación de llamadas, las llamadas de conferencia o la llamada en espera. Los servicios nuevos más destacados son el Servicio de Mensajes Cortos o SMS (*Short Message Service*) y el *roaming* (itinerancia). La tecnología 2G tenía que coexistir con la anterior de la primera generación sin producir interferencias entre ellas, además debía mantener la calidad en las transmisiones de voz conseguida en 1G a 900 MHz.

Los esquemas digitales característicos de esta generación fueron TDMA (Acceso Múltiple por División del Tiempo) y CDMA (Acceso Múltiple por División de Código). Los sistemas con más éxito de implementación fueron GSM (TDMA), IS-136 (TDMA) e IS-95 (CDMA). Con esta tecnología totalmente digital se mejora la eficiencia espectral, se pueden utilizar códigos de encriptación y de corrección de errores que aumentan la calidad y seguridad del servicio. Las tasas de transmisión de datos alcanzan valores entre 14 y 64 kbps.

GSM (*Global System for Mobile Communications* – Sistema Global para las comunicaciones Móviles) fue creado por la CEPT, compuesta de representantes de las Administraciones europeas relacionadas con la planificación y control de las comunicaciones, que decidió en 1982 crear un grupo de trabajo con la misión de preparar un estándar de telefonía móvil a nivel europeo. Aunque su implementación principal es en Europa, GSM alcanzó un desarrollo global (85% de la población) y hoy en día sigue en uso. Existen tres modos de GSM en las bandas de frecuencias de 1800, 1900 y 900 MHz siendo esta última la más extendida. La aparición de los móviles “tribanda” hace referencia a dispositivos que pueden funcionar en las tres bandas.

CDMA permite que un elevado número de comunicaciones simultáneas, ya sean de voz o de datos indistintamente, compartan el mismo medio de comunicación asignándoles códigos únicos y ortogonales entre sí dentro del canal. El estándar norteamericano IS-95 conocido comercialmente como cdmaOne está basado en esta idea, y fue empleado para transmisión de voz, señalización y datos (esto último de forma muy limitada). No llegó a popularizarse en Europa.

3.2.1 GPRS y EDGE (2.5G - 2.75G)

Los dispositivos de segunda generación han ido evolucionando hasta tal punto que se puede hablar de una “generación 2.5” consistente en móviles que, sin ser 3G, incorporan algunas de las mejoras más comunes de este último estándar.

GPRS (*General Packet Radio Service*) proporciona datos por conmutación de paquetes para ofrecer transferencia e Internet de alta velocidad de datos, principalmente a redes GSM. Se introdujeron otros servicios como el SMS o el MMS (*Multimedia Messaging System*), soporte WAP (*Wireless Application Protocol*) o servicios P2P a través de IP. Además, este protocolo permitió abaratar las tarifas y la posibilidad de reservar más de un canal para una misma comunicación sin saturar la red. La tasa binaria máxima alcanzada era de unos 115 kbps.

El protocolo EDGE (*Enhanced Data rates for GSM Evolution*) es una evolución de GPRS, mediante la aplicación de una nueva capa física. No añade ningún servicio nuevo a GPRS, pero mejora la capacidad de transmisión de datos con tasas de hasta 384 kbps. Utiliza el mismo espectro y ancho de canal que GSM, además de usar tramas TDMA. Sin embargo, utiliza una nueva codificación de canal e introduce la modulación 8-PSK.

3.3 Tercera generación (3G)

A comienzos de siglo la demanda de servicios de comunicaciones móviles aumentó, y también la necesidad de mayores tasas de datos para ofrecer mejores y nuevos servicios: mejores conexiones a Internet desde los dispositivos, video en *streaming*, descarga de archivos o videollamadas en tiempo real. Además, se pretendía mejorar la calidad de las comunicaciones por voz para obtener resultados muy parecidos a la red cableada fija. Con los sistemas 3G también se consiguió una red de cobertura prácticamente global, con el servicio de *roaming* entre países para todos los usuarios. Las tasas obtenidas con estándares 3G varían entre los 384 kbps y los 2 Mbps en condiciones ideales.

El marco para el desarrollo de esta tercera generación fue establecido por la ITU (*International Telecommunication Union*) en la llamada IMT-2000, que marca el estándar para que todas las redes 3G sean compatibles unas con otras. Europa ha sido pionera en el nacimiento de la 3G, a través de los programas de investigación RACE, ACTS e IST, iniciados en los años 90, y más tarde dentro de la propia ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*). Existen dos grandes estándares en 3G, WCDMA y CDMA2000. El primero estandarizado por el 3GPP (*Third Generation Partnership Project*) y basado en la infraestructura 2G de GSM y el segundo estandarizado por el 3GPP2 y basado en el sistema americano de CDMA (IS-95). Nos centraremos en el sistema UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*), ya que es el sistema más expandido en Europa, basado en WCDMA.

Entre 1998 y 1999 se desarrolló por parte de 3GPP del que forma parte la ETSI el sistema de comunicaciones móviles de tercera generación UMTS basado en la evolución de las redes GSM y en las tecnologías de radio acceso TDD y FDD, definidas años antes por la ETSI. Los dispositivos UMTS son totalmente compatibles con el sistema 2G de GSM y pueden alternar entre ambas redes.

Se realizaron pruebas para la implementación del estándar entre 2003 y 2007 y, en agosto de 2007 fue el fabricante Ericsson el primero en completar las llamadas en WCDMA (el cual se explicará más adelante) para las bandas de frecuencia que fueron definidas por 3GPP.

Entre las mejoras introducidas cabe destacar:

- Fácil de usar.
- Bajo coste para el usuario, al ofrecer gran variedad de formas de tarifa, tales como pago por byte, por sesión, tarifa plana...
- Nuevos servicios, gracias a que soporta el protocolo IP y a su elevada tasa de transmisión de datos.
- Acceso rápido.

Para lograr todos estos avances y cumplir con los requisitos de un estándar 3G, UMTS se ayuda de los conceptos mencionados anteriormente: WCDMA (*Wideband Code Division Multiple Access*), TDD (*Time Division Duplexing*) y FDD (*Frequency Division Duplexing*).

WCDMA es una técnica de acceso al medio que sustituye a TDMA utilizada en 2G y que permite identificar a los usuarios por un código único para codificar su señal, en lugar de darles un tiempo determinado para comunicarse. De esta forma múltiples usuarios pueden establecer una comunicación al mismo tiempo y ocupando la misma zona del espectro sin que se produzcan interferencias. La estación base solo tiene que decodificar con ese código único de usuario y separar las señales para distinguir las diferentes comunicaciones. De este modo, la eficiencia del ancho de banda disponible para la comunicación era mucho mayor.

En UMTS-WCDMA se trabaja en frecuencias de entre 1900 y 2100 MHz, con un ancho de banda entre portadoras de unos 5 MHz. La modulación utilizada es la QPSK. Existen dos modos de trabajo en UMTS

- FDD: Existen dos portadoras por canal de radio. Estas portadoras son utilizadas para las transmisiones del enlace ascendente (UL) y descendente (DL), es decir, el enlace de subida utiliza una banda de frecuencias diferente a la que utiliza el enlace de bajada. Es necesario entonces asignar un par de bandas de frecuencia para su operación. Estas frecuencias se denominan frecuencias emparejadas. El modo FDD resulta adecuado para servicios simétricos, con una amplia gama de velocidades.
- TDD: La transmisión UL y DL se realiza sobre una única portadora utilizando intervalos de tiempo sincronizados. Dado que se utiliza un único canal de radio, se dice que este modo opera en bandas de frecuencias no emparejadas. El modo TDD resulta adecuado para servicios asimétricos en entornos de interiores y micro-celulares. En este modo, los requisitos de sincronización son más estrictos y exigen más márgenes (*overhead*) para los tiempos de guarda y rampas de variación de potencia.

Por último, debido a las nuevas aplicaciones introducidas por UMTS se crearon varias categorías de calidad para suplir las necesidades y el presupuesto de los diferentes tipos de usuarios. En la Tabla 3-2 se muestra un resumen de los servicios cubiertos por cada clase.

Tabla 3-2 Clasificación de servicios UMTS

Tipo de tráfico	Conversacional	Streaming	Interactiva	Background
Características fundamentales	Preservar la relación entre las distintas entidades de información de la comunicación. Patrón de conversación muy sensible al retardo.	Preservar la relación entre las distintas entidades de información de la comunicación.	Patrón petición respuesta. Preservar el contenido útil.	El destino no espera la información en un tiempo concreto. Preserva el contenido útil.
Ejemplos	Voz	Vídeo bajo demanda	Acceso a páginas Web	Correo electrónico

3.3.1 HSDPA, HSUPA y HSPA+ (Beyond 3G)

Igual que en 2G, la tercera generación desarrolló nuevas versiones del mismo estándar que sin ser consideradas parte de la siguiente generación, si suponían un avance respecto a los requisitos de 3G iniciales.

- HSDPA (*High-Speed Downlink Packet Access*): Los principales objetivos de HSDPA son incrementar la tasa de transferencia por usuario, mejorar la calidad de servicio ofrecida y, en general, mejorar la eficiencia espectral, especialmente para los servicios de datos, asimétricos y con tráfico a ráfagas, como son la mayoría de los servicios de Internet. Se alcanzan velocidades de bajada de hasta 14 Mbps.
- HSUPA (*High-Speed Uplink Packet Access*): protocolo de acceso de datos para redes de telefonía móvil con alta tasa de transferencia de subida, pensado para mejorar el HSDPA potenciando la conexión de subida de UMTS/WCDMA. Con HSUPA se mitiga el efecto de la asimetría en las capacidades entre DL y UL, haciendo posible la oferta de servicios avanzados P2P. Se alcanzan tasas de 5,7 Mbps en enlace ascendente, aunque posteriormente se lograrían hasta 11,5 Mbps y se reducen los tiempos de retardo.
- HSPA+ (*Evolved High-Speed Packet Access*): introduce la posibilidad de utilizar una arquitectura totalmente IP. Aunque la estructura principal de UMTS existente se puede seguir utilizando, la posibilidad de que las estaciones base puedan conectarse a Internet vía IP consigue hacer la red más rápida, fácil de desplegar y más operativa.

3.4 Cuarta generación (4G)

Durante muchos años, las llamadas de voz dominaron el tráfico en las redes de comunicaciones móviles. El crecimiento de los datos móviles fue inicialmente lento, pero en los años previos a 2010 su uso aumentó de forma drástica.

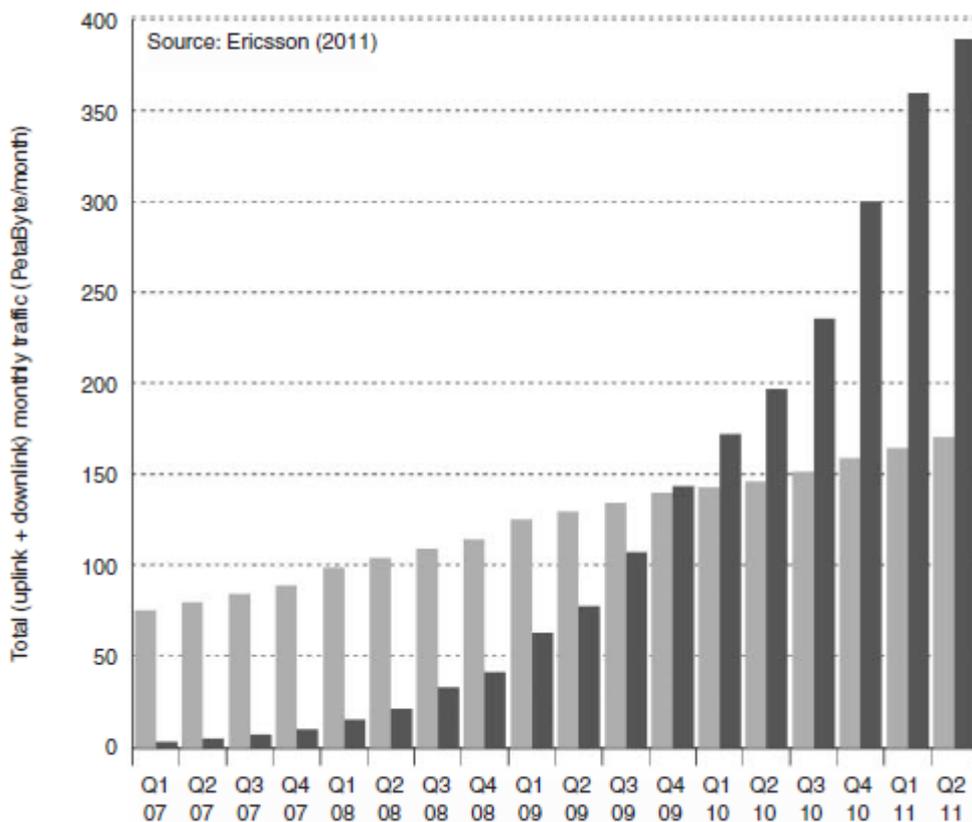


Figura 3-2 Mediciones del tráfico de voz y datos en redes de telecomunicaciones móviles en todo el mundo, en el período comprendido entre enero de 2007 y julio de 2011. Fuente: Ericsson

Este aumento exponencial de tráfico de datos colapsó rápidamente la capacidad de las redes 2G y 3G por parte de usuarios y desarrolladores. Además de la necesidad de un gran aumento de la capacidad, existían 3 problemas más que nos llevaban a la creación de 4G. Las redes 2G y 3G tenían que mantener dos sistemas principales: la red de conmutación de circuitos para la voz y la de conmutación de paquetes para el tráfico de datos. Las redes 3G introducían retrasos de hasta 100 milisegundos que eran perjudiciales para servicios como juegos con interacción en tiempo real. En tercer lugar, las especificaciones para UMTS y GSM se volvieron cada vez más complejas a lo largo de los años, debido a la necesidad de agregar nuevas funciones al sistema y mantener la compatibilidad con los dispositivos anteriores. Con una nueva generación con una red basada totalmente en IP, incluyendo VoIP (*Voice over IP*) todas las dificultades anteriores podían ser resueltas.

A partir de 2004, 3GPP comenzó un grupo de trabajo para desarrollar la mejora de UMTS conocida como LTE (*Long Term Evolution*). La ITU creó su propio comité de trabajo, el IMT-Advance, para establecer como en 3G unas especificaciones mínimas para que una red sea considerada de cuarta generación.

En 2008 se lanzó la primera versión de LTE por parte de 3GPP (*Release 8*) y el primer sistema comercial llegó en 2009. Sin embargo, estas primeras redes no cumplían las especificaciones para 4G impuestas por la ITU, por lo que a estas tecnologías se las conoce como 3.9G. LTE siguió desarrollándose hasta que en 2011 se lanzó el estándar LTE-Advanced (LTE que cumple los requisitos de la IMT-Advance) y que es la *Release 10* de 3GPP. En la Figura 3-3 se resumen cronológicamente las distintas versiones de LTE desarrolladas por 3GPP. Existe otra tecnología 4G llamada WiMAX, estandarizada por el IEEE (802.16) que también ofrece servicios de comunicaciones móviles cumpliendo los requisitos del IMT-Advance.

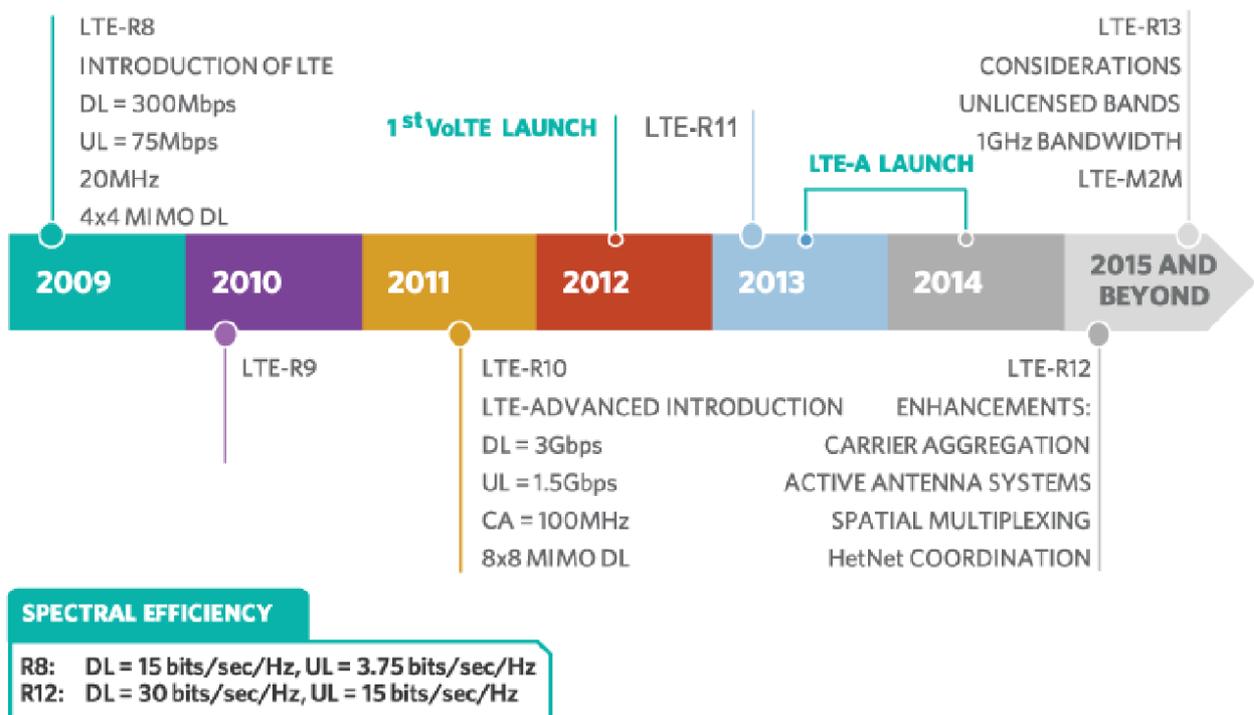


Figura 3-3 Cronología de la evolución de LTE

Exponemos a continuación las características principales de las redes 4G, así como las mejoras respecto a la generación anterior:

- Ancho de Banda de 1.4, 3, 5, 10, 15 o 20 MHz, opcionalmente hasta 100 MHz en LTE-Advance y células más pequeñas que en 3G para aumentar la capacidad de la red.
- Tecnología totalmente basada en IP.
- Tasas de datos de 100 Mbps para movilidad alta y de hasta 1 Gbps con movilidad reducida (1 Gbps DL y 500 Mbps UL). Latencias menores de 100 ms llegando a reducirse hasta 10 ms.
- Esquemas de acceso múltiple: OFDMA, basado en OFDM y SC-FDMA. Estos esquemas y la forma de onda OFDM de 4G, así como sus ventajas e inconvenientes para 5G serán el tema principal del siguiente capítulo. Con estas técnicas logramos un uso más eficiente del espectro.
- Se utilizan numerosas bandas de frecuencias, desde los 700 MHz hasta los 2600 MHz en función de los países donde se desplieguen las redes.
- Modulaciones QPSK, 16-QAM y 64-QAM sobre OFDM.
- Interfuncionamiento con sistemas previos. Integración total de todos los sistemas actuales, antiguos y futuros para asegurar una movilidad total de una tecnología a otra.
- Roaming de cobertura prácticamente global.
- Uso de nuevas técnicas como MIMO (múltiples antenas), diversidad para garantizar una tasa concreta o conformado de haz para apuntar mejor a los usuarios de interés.

3.5 Quinta generación (5G)

Actualmente la evolución de las comunicaciones móviles prosigue hacia una revolución total. Los avances tecnológicos y sociales nos llevan hacia una sociedad totalmente conectada, y en esta tarea las comunicaciones móviles juegan un papel crucial. Esta evolución puede verse reflejada en los hechos que motivaron el inicio del desarrollo de la nueva generación de comunicaciones móviles 5G:

- Brutal crecimiento del tráfico de datos. El tráfico de datos ha aumentado 200 veces y se prevé que aumente en 20.000 veces en 2030 respecto al tráfico de datos de 2010. En la Figura 3-4 se puede observar la estimación del aumento del tráfico de datos hasta 2030.
- Gran incremento del mercado y del uso de dispositivos conectados. Aunque los *smartphones* seguirán siendo el dispositivo más destacado para los usuarios, el número de otros dispositivos conectados como dispositivos portátiles, tablets o dispositivos MTC (*Machine Type Communications*) está en aumento.
- Continuo surgimiento de nuevos servicios y escenarios. Servicios para empresas, la industria vertical o servicios para las compañías de Internet. Entre estos servicios destacan algunos como IoT (*Internet of Things*) o las comunicaciones V2X (*Vehicle to Everithing*).

La quinta generación de comunicaciones móviles 5G, por tanto, nace con el reto de suplir demandas nuevas y sin precedentes que se encuentran más allá de la capacidad de cualquiera de los sistemas anteriores [2].

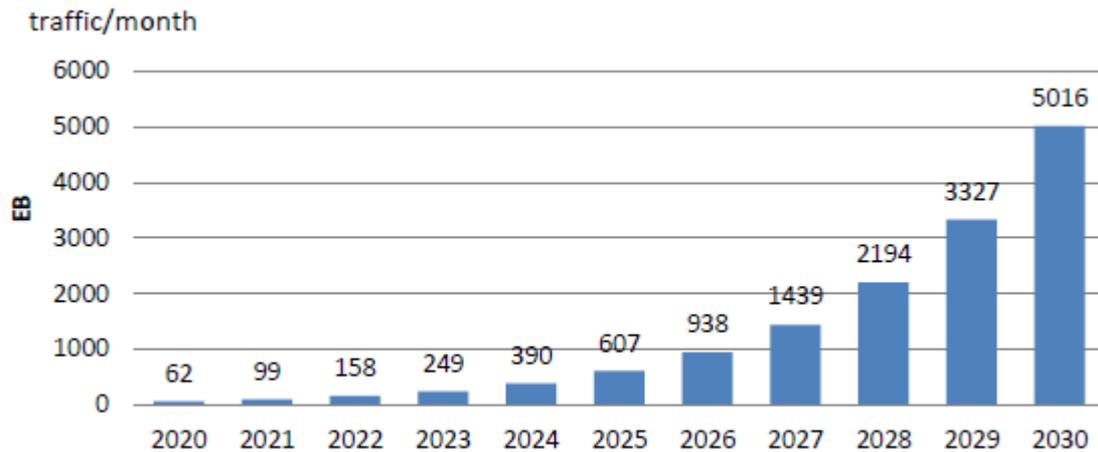


Figura 3-4 Estimación del tráfico móvil global en 2020-2030 (tráfico M2M incluido, 1 EB = 10^{18} bytes)

La ITU expone varias tendencias que explican la intensificación del tráfico de datos actualmente y en el futuro hacia 5G, algunas de las más importantes se describen a continuación:

- Implementación acelerada de nuevas tecnologías: Las nuevas tecnologías incrementarán la tasa de transmisión y la calidad de experiencia (QoE) lo cual requiere un mayor tráfico de datos.
- Internet de las cosas (IoT): El IoT tiene su base teórica en la adición de sensores y conectividad a cualquier objeto o dispositivo convirtiéndolos en inteligentes. El paso de mensajes entre dispositivos y controladores provoca un aumento en el tráfico de datos en redes móviles.
- *Machine-to-machine* (M2M): Las aplicaciones y dispositivos M2M (máquina a máquina) es uno de los segmentos que presenta un crecimiento más rápido en el uso de redes móviles. Estas máquinas podrán usar las redes móviles para comunicarse entre sí u obtener información de una red o servidor.
- Crecimiento del *streaming* de audio/vídeo: Cada vez es más común que el usuario utilice su terminal para entretenimiento en vivo que requiere un gran ancho de banda, lo que incrementa el consumo de datos.
- La evolución en el uso y las características del tráfico: Las características del tráfico están evolucionando hacia la posibilidad de cambiar durante la conexión la velocidad de la transmisión. Esto conlleva a un aumento en el tráfico neto en la red.
- *Cloud computing*: La demanda dirigida hacia los servicios móviles en la nube está creciendo ya que existen cada vez más servicios que requieren acceso de manera ubicua. Si crece la demanda de estos servicios, crecerá el tráfico entre servidores, dispositivos y datos en la nube.

3.5.1 Usos, servicios y escenarios de 5G

En 2015 3GPP estableció varios grupos de trabajo para la elaboración de estándares 5G de los cuales hablaremos más adelante. Desde ese mismo año la ITU creó otro grupo de trabajo dedicado a definir las necesidades y los requisitos de las redes 5G, recogidos en el estándar IMT-2020.

El IMT-2020 define unos escenarios de uso para clasificar la utilidad de los nuevos servicios y capacidades de 5G en entornos concretos. En la Figura 3-5 se representan varias aplicaciones para 5G y con qué escenario concuerda más. Existen tres escenarios de uso actualmente:

- *Enhanced Mobile Broadband (eMBB)*: La banda ancha móvil aborda casos de uso centrados en el hombre para el acceso a contenido multimedia, servicios y datos. La demanda de banda ancha móvil seguirá aumentando, como hemos destacado anteriormente, explicando el aumento de tráfico de datos para el futuro cercano. Una de las mejoras más importantes en este ámbito será un gran aumento de las tasas de datos.
- *Massive Machine-type Communications (mMTC)*: Este caso de uso se caracteriza por un gran número de dispositivos conectados que transmiten normalmente un volumen bajo de datos no sensibles al retardo. Los dispositivos deben ser de bajo coste y tener una batería de larga duración. Por lo general estos dispositivos serán sensores enviando información a un servidor o a la nube. Una importante aplicación en este escenario es IoT masivo.
- *Ultra-reliable and Low-latency Communications (URLLC)*: Este caso de uso tiene requisitos estrictos para capacidades tales como rendimiento, latencia y disponibilidad. Algunos ejemplos incluyen el control inalámbrico de la fabricación industrial o los procesos de producción, la cirugía médica remota, la automatización de la distribución en una red inteligente o las comunicaciones V2X destinadas a la conducción autónoma.

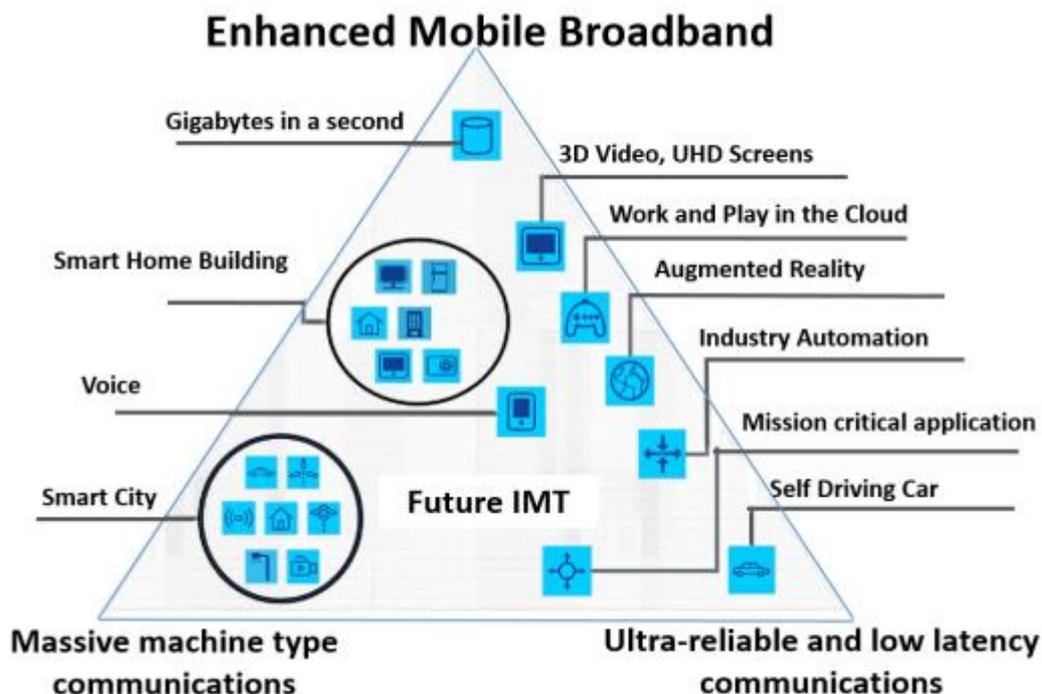


Figura 3-5 Escenarios de uso de 5G definidos por el IMT-2020

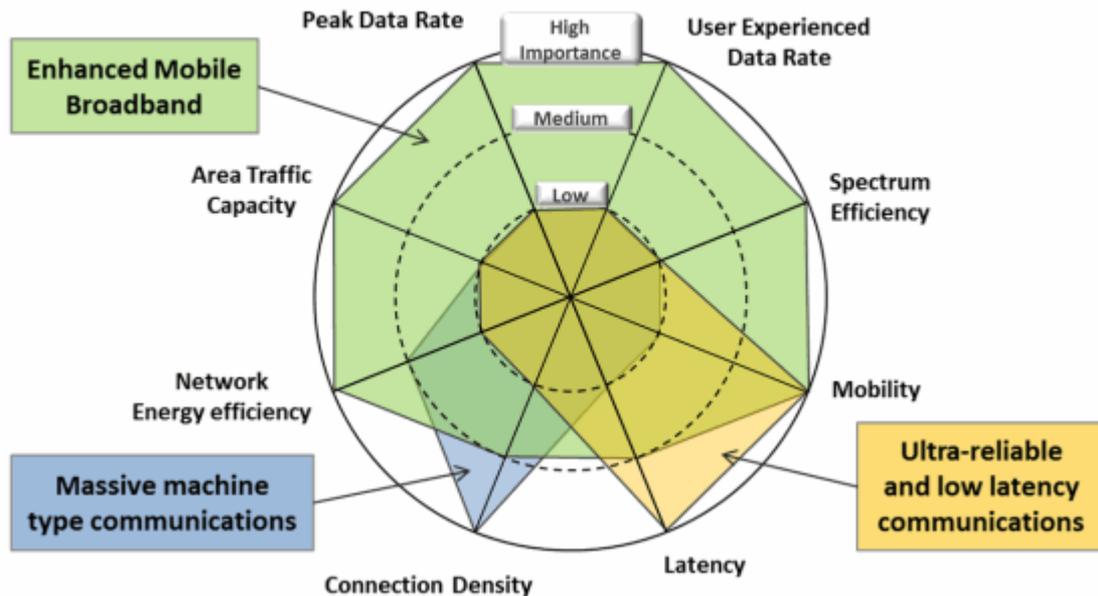


Figura 3-6 Importancia de capacidades clave en los diferentes escenarios de uso

En la Figura 3-6 se representa la importancia de cada característica de las comunicaciones móviles en los 3 escenarios de uso que se han definido para 5G. Es seguro que en el futuro aparezcan nuevas aplicaciones y escenarios de uso para estas redes que aún ni siquiera podemos imaginar. Por tanto, es fundamental que las redes y dispositivos 5G sean flexibles y tengan una gran capacidad de adaptarse a nuevas aplicaciones con nuevos requerimientos.

3.5.2 Requisitos y capacidades de 5G

A lo largo de esta sección hemos planteado muchas aplicaciones y necesidades que podrán ofrecernos las nuevas redes 5G. A continuación, se expondrán las capacidades claves de las redes 5G y los requerimientos que define la ITU a través de la IMT-2020.

En la Figuras 3-7 y 3-8 se ilustran los objetivos principales de mejora de las redes 5G respecto sus antecesoras de 4G. Cada uno de los requisitos de 5G está destinado a un escenario más o menos concreto, sin embargo, estos objetivos no tienen que ser alcanzados en su total capacidad simultáneamente. Esto nos lleva de nuevo a la necesidad de dispositivos y sistemas con rápida adaptación y una flexibilidad que nos permita cambiar sus parámetros para tener la capacidad de ejecutar varias aplicaciones en la misma red.

Para obtener estas enormes mejoras en tasas de datos, latencia, elevado número de usuarios conectados simultáneamente, etc.; se deben cumplir los siguientes requisitos. Una disponibilidad amplia del espectro y una correcta compartición eficiente del mismo. Numerosos dispositivos y aplicaciones diversas implican un gran uso del espectro disponible que debe ser aumentado y reglado (mayor ajuste al ancho de banda disponible en la capa física) para que pueda compartirse sin producir interferencias entre las comunicaciones. Los dispositivos deben permitir que la generación de señal sea flexible y permita combinar distintas tasas de bits dependiendo de la aplicación que se esté desarrollando. Por último, es necesario renovar la estructura de las redes reduciendo el tamaño de las células. Esto permitirá obtener una mayor capacidad que pueda soportar el aumento del tráfico y de usuarios que está por llegar.

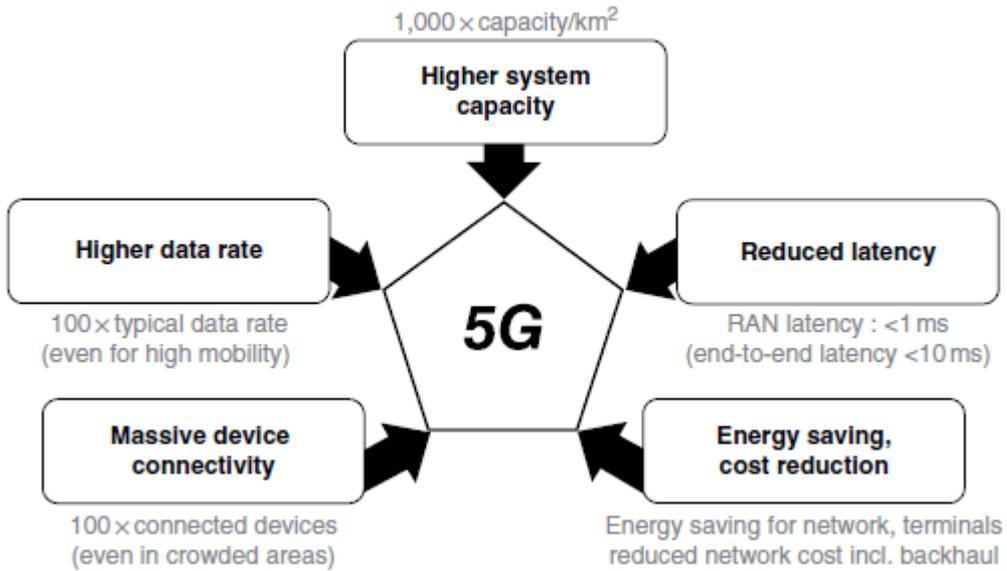


Figura 3-7 Objetivos de rendimiento de 5G

Enhancement of key capabilities from IMT-Advanced to IMT-2020

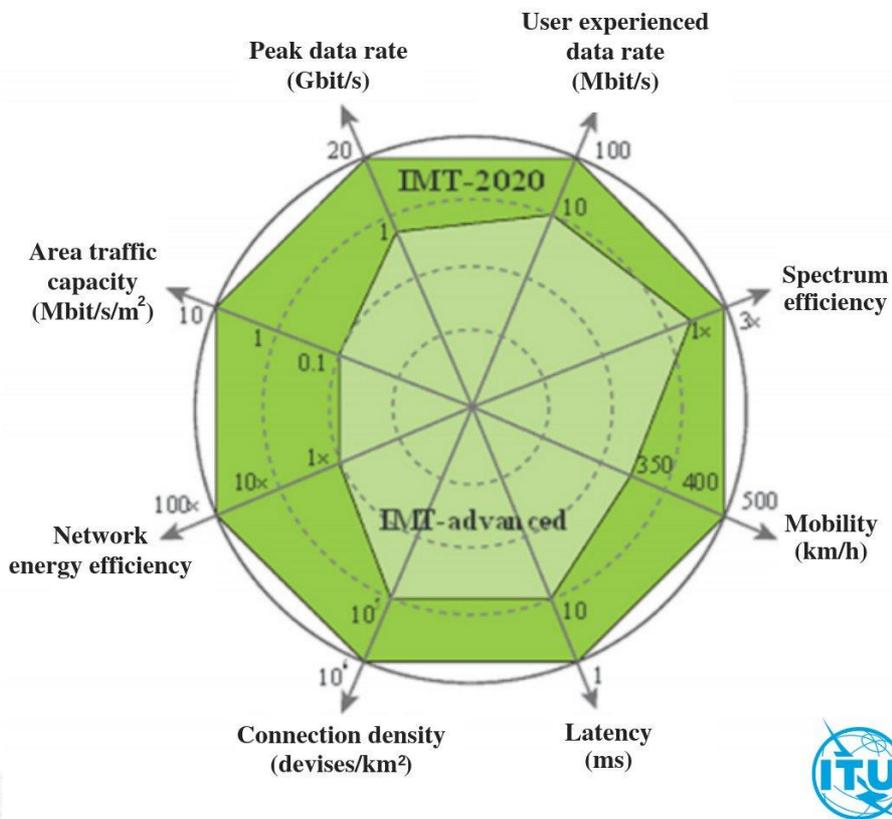


Figura 3-8 Mejora de capacidades clave de IMT-Advanced a IMT-2020

3.5.3 5G New Radio (3GPP releases 15 y 16)

Actualmente existen dos estándares desarrollados por 3GPP en relación a 5G, las *releases* 15 y 16. A estos estándares se les conoce como 5G NR (*New Radio*), podemos ver la cronología de su desarrollo en la Figura 3-9. La versión 14 se basa en mejoras de LTE y avances hacia 5G, pero no es hasta diciembre de 2017 en la versión 15 de 3GPP donde se define por primera vez 5G NR Non-Stand-Alone (NSA) utilizando dispositivos que se conectarían vía LTE y NR para realizar pruebas comerciales del futuro 5G sobre redes ya implementadas.

Más tarde, a la mitad de 2018 se crea un nuevo estándar de 5G NR en su segunda fase conocido como Standalone (SA). Este estándar está preparado para implementar *New Radio* en lugares donde no exista una infraestructura previa de LTE, creando redes 5G desde cero. 5G NR es una adaptación de OFDM utilizado en LTE con mayores posibilidades que permiten que su rendimiento mejore considerablemente y se acerque al de 5G. 5G *New Radio* además utiliza nuevas partes del espectro destinadas exclusivamente a NR y el uso de haces analógicos y digitales para optimizar de la intensidad de la señal.

No obstante, estos estándares no cumplen aún por completo los requisitos para 5G de la IMT-2020, sino que son versiones de pruebas comerciales para establecer un primer paso hacia el futuro de redes totalmente 5G. Actualmente la última versión de 3GPP (*release* 16) cuya finalización se espera que sea en marzo de 2020, será el primer estándar que cumpla por completo todos los requerimientos de 5G. Además, contendrá estudios y procesos formales sobre las aplicaciones más destacadas como IoT, comunicaciones V2X o incluso acceso a satélites 5G.

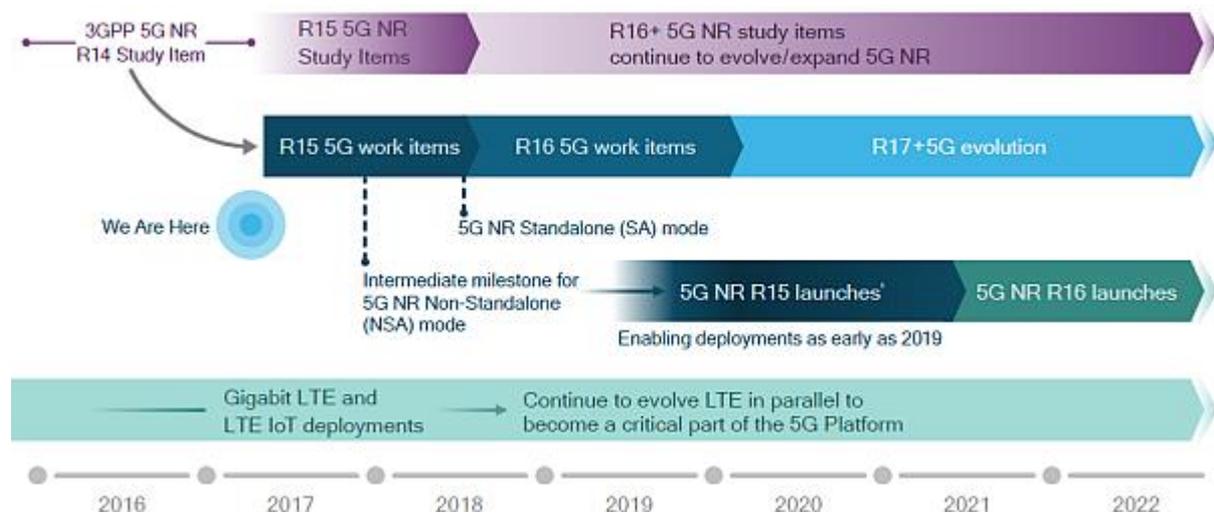


Figura 3-9 3GPP 5G estándares en el tiempo

4 FORMA DE ONDA DE 4G Y 5G-NR: OFDM

En este trabajo se analiza una nueva forma de onda para las futuras comunicaciones móviles en el siguiente capítulo. Para comprender mejor este estudio debemos conocer previamente la forma de onda utilizada en los sistemas actuales (4G y 5G NR): OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*). De esta forma, podremos analizar las ventajas que nos ofrece OFDM y sus inconvenientes a la hora de afrontar los nuevos retos que las redes 5G pretenden abordar.

4.1 OFDM

La idea fundamental detrás de OFDM es dividir el ancho de banda disponible en un número concreto de subbandas más estrechas donde se encuentra la información que queremos transmitir. La transmisión se realiza mediante una única portadora en cada subcanal del espectro a una tasa menor que la empleada para transmitir todos los subcanales en su conjunto. En consecuencia, podemos considerar OFDM como un mecanismo de transmisión multiportadora en el que algunos símbolos de datos se asignan en subportadoras, moduladas cada una de ellas mediante QAM o PSK [3].

La clave de OFDM reside en que cada una de las subportadoras que conforman la señal es ortogonal en el espectro respecto a las demás evitando así la interferencia entre los subcanales adyacentes. Esto también nos permite reducir considerablemente el ancho de banda necesario para transmitir, ya que podemos comprimir el espectro sin provocar efectos de interferencia en nuestra señal gracias a la ortogonalidad de las subportadoras. En la Figura 4-1 se representa una señal OFDM con 7 subportadoras, cada una de un color en el dominio de la frecuencia.

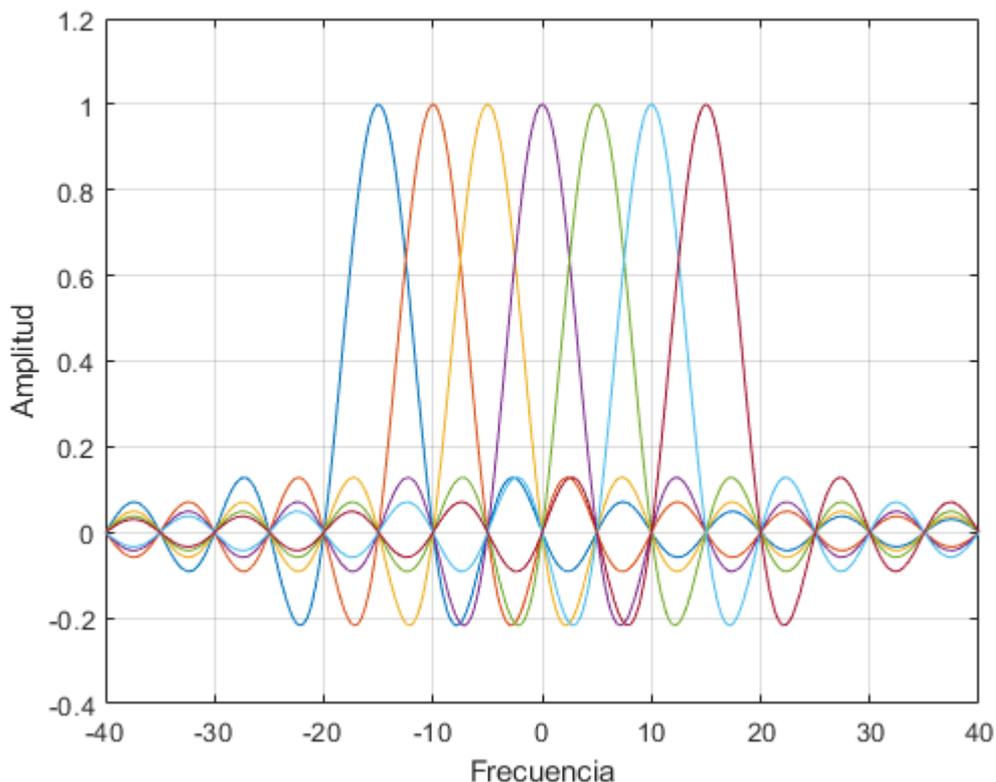


Figura 4-1 Espectro OFDM para 7 subportadoras

Los símbolos OFDM se expresan de la siguiente manera en el dominio del tiempo:

$$s(t) = \sum_{k=0}^{N-1} X(k)p_k(t) = \sum_{k=0}^{N-1} X(k)e^{j2\pi k\Delta f t} \text{rect}(t - T_s)$$

donde $X(k)$ es el símbolo complejo modulado (8-QAM, 16-QAM, QPSK, ...) en la subportadora k , siendo $k = 0, 1, \dots, N-1$ y N el número total de subportadoras de la señal OFDM. Por tanto, cada símbolo OFDM generado por un transmisor contiene N elementos de $X(k)$.

Para obtener los símbolos en el receptor y obtener la información solo habría que multiplicar por la exponencial contraria ($e^{-j2\pi k\Delta f t}$) e integrar en el período de símbolo OFDM, T_s . Utilizando el principio de ortogonalidad que cumplen las subportadoras podemos obtener cada símbolo complejo de vuelta mediante el proceso anterior. Esto se consigue si $\Delta f_t = 1 / T_s$, de esta manera el resultado de la integración en el período de un símbolo OFDM entre dos subportadoras cualesquiera x_i y x_j solo es no nulo si $i = j$. Si lo expresamos matemáticamente:

$$\frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} x_i(t) * x_j(t) dt = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} e^{j2\pi(i-j)\Delta f t} dt$$

Sin embargo, a la hora de una implementación real de esta forma de onda no se utiliza este método. La transmisión y recepción de una señal OFDM se realiza mediante el uso de la DFT (*Discrete Fourier Transform*) y la IDFT (*Inverse Discrete Fourier Transform*) respectivamente. El enorme parecido entre las expresiones de la transformada discreta y la señal OFDM en banda base hace que se pueda implementar su modulación y demodulación mediante estos procesos de una forma eficiente. En formato digital implica la ejecución de los algoritmos de la FFT (*Fast Fourier Transform*) y la IFFT (*Inverse Fast Fourier Transform*) para generar y demodular los símbolos OFDM de la siguiente manera:

$$s(n) = \text{IFFT}\{X(k)\}$$

y

$$X(k) = \text{FFT}\{s(n)\}.$$

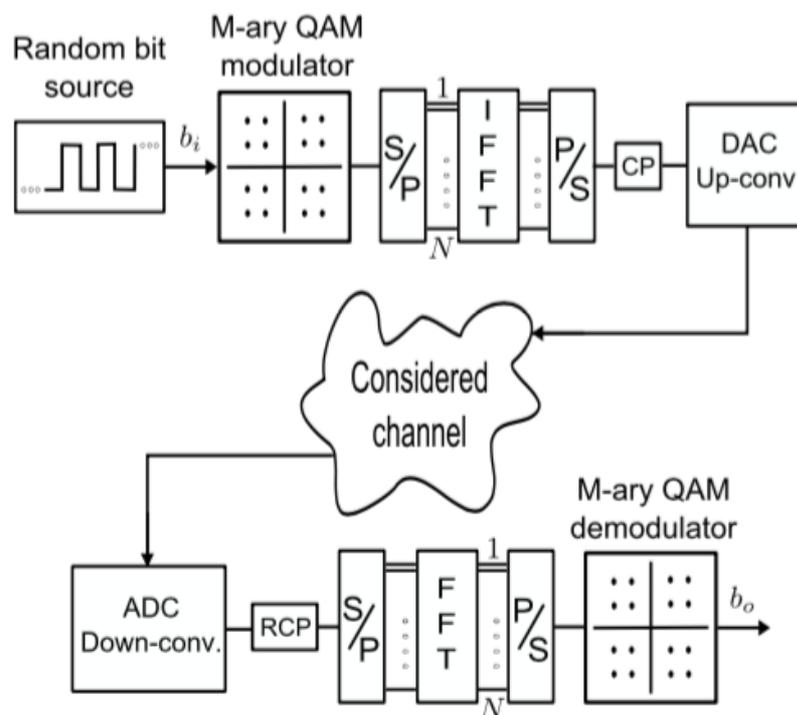


Figura 4-2 Esquema Tx/Rx de una señal OFDM

Como se puede observar en el diagrama de bloques de la Figura 4-2 para un transmisor-receptor de OFDM, la mayoría de los estándares utilizan CP-OFDM (Cyclic Prefix-OFDM) en lugar de OFDM. La diferencia es tan simple como añadir un prefijo cíclico al comienzo de cada símbolo OFDM con el fin de mejorar la sincronización temporal de las tramas OFDM. El uso del prefijo cíclico actualmente en OFDM es obligatorio en casi toda implementación real para poder obtener transmisiones lo suficientemente eficientes ante situaciones de multitrayecto. Este concepto se discutirá en detalle en el apartado 4.4.1.

4.2 Capa física de LTE (4G)

La capa física de la cuarta generación de comunicaciones móviles se basa, como anunciamos en el capítulo anterior, en la forma de onda que acabamos de introducir: OFDM. En concreto el estándar LTE utiliza dos esquemas de transmission: SC-FDMA (*Single Carrier-Frequency Division Multiple Access*) para el *uplink* y OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access*) en el *downlink*, en ambos casos la forma de onda utilizada para enviar la información es OFDM. Cabe destacar que en ambos casos se dejan la portadora central y las laterales a potencia cero para evitar problemas de *carrier leakage* y para reducir el ancho de banda de transmisión y así poder cumplir las canalizaciones decididas en el estándar respectivamente.

4.2.1 OFDMA

OFDMA es la versión de OFDM para acceso múltiple que se utiliza en el enlace descendente en LTE. Como en OFDM tenemos muchas subportadoras repartidas en el ancho de banda disponible para transmitir, para conseguir el acceso múltiple asignamos a cada usuario un número concreto de las mismas. De manera dinámica OFDMA va asignando subportadoras a los diferentes usuarios en los intervalos de tiempo definidos para cada símbolo OFDM. Según el tráfico que necesite cada usuario se le otorgarán más o menos portadoras.

4.2.2 SC-FDMA

En el caso del enlace ascendente LTE requiere que la potencia consumida para transmitir sea menor, ya que se realiza desde los terminales de usuario. Mediante SC-FDMA se consigue una mayor eficiencia a la hora de realizar una transmisión en el *uplink*. En ambos casos podemos dividir el ancho de banda en subcanales de tamaños diferentes para cada usuario. Sin embargo, la implementación de SC-FDMA es diferente a OFDMA como se muestra en la Figura 4-3. Esta diferencia en el diagrama de bloques permite a SC-FDMA hacer transmisiones con menos PAPR mejorando la eficiencia de la transmisión para el *uplink*.

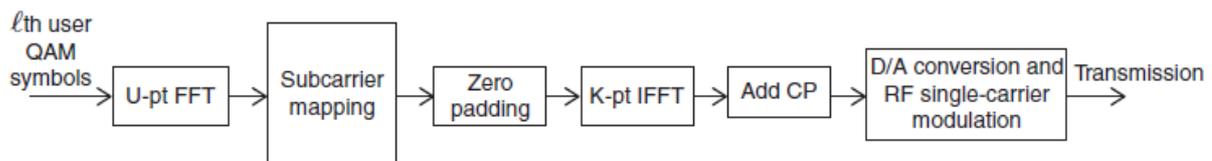


Figura 4-3 Esquema de un transmisor SC-FDMA utilizado en *uplink* en LTE

Debido a la operación FFT de U puntos como se ve en el diagrama, SC-FDMA consigue una PAPR más pequeña que OFDMA puro, ya que la señal transmitida es básicamente equivalente a una señal de portadora única sobremuestreada [4].

4.3 Capa física de 5G-NR

Actualmente el estándar que existe para 5G es 5G-NR y, aunque no cumple los requisitos mínimos del IMT-2020, sí ofrece mejoras respecto a LTE. Si ya vimos de forma teórica la idea detrás de 5G-NR en el capítulo anterior, en este apartado nos centraremos en su capa física y su implementación real. En resumen, podríamos definir 5G-NR como una actualización con pequeñas mejoras y más posibilidades de configuración de la capa física de LTE. Esto quiere decir que tanto la forma de onda OFDM como la configuración de los mensajes de LTE son la base de este estándar que recoge más posibilidades en las configuraciones para conseguir mejores prestaciones en situaciones concretas y cercanas a los posibles escenarios de 5G.

5G-NR es, entonces, una prueba para testear los resultados que puede ofrecer OFDM ante los escenarios más exigentes que se proponen para las redes 5G. Tras describir la capa física de este estándar, revisaremos las ventajas que proporciona OFDM, los motivos por los que fue elegida en LTE y las desventajas que se han observado ante las nuevas situaciones que se plantean, así como las mejoras que debemos buscar en nuevas formas de onda que puedan mejorar el rendimiento de OFDM para 5G.

4.3.1 Forma de onda, numerología y estructura de la trama

La flexibilidad a la hora de formar las tramas en función de distintos anchos de banda en el espectro en base a los parámetros de la señal OFDM se conoce como numerología en el ámbito de 5G-NR. A continuación, se describirán las diferentes posibles configuraciones que nos ofrece el estándar NR (New Radio), así como las formas de ondas utilizadas y las estructuras de las tramas en cada situación. Respecto al acceso múltiple se utiliza OFDMA (*release 15*), aunque para un futuro se están barajando nuevas opciones como NOMA (*Non Orthogonal Multiple Access*) y SCMA (*Sparse Code Multiple Access*).

En 5G NR también se utiliza para el UL DFT-S-OFDM (DFT-spread OFDM). Con esta forma de onda se realiza un procesamiento previo de expansión con la transformada discreta de Fourier (DFT-spread), en el que se realiza la transformada de Fourier de los bits a transmitir, que previamente han sido asignados a las entradas de la DFT mediante una matriz de correspondencia, asignándose sus salidas a las subportadoras en el dominio de la frecuencia a través de otra matriz de correspondencia, para finalmente someter el resultado a una transformada inversa, procediéndose entonces a modular una portadora con dicha señal. Las matrices se pueden configurar de manera que se consiga una relación de potencia de pico a potencia promedio baja (PAPR), permitiendo una mejor eficiencia en los amplificadores de potencia de los terminales móviles [5].

En NR se define el espacio entre subportadoras en la señal OFDM de forma escalable de la siguiente manera:

$$\Delta f = 2^{\mu} \cdot 15 \text{ kHz}$$

Con esta definición se permiten los siguientes valores de separación entre subportadoras o SCS (*SubCarrier Spacing*):

Tabla 4-1 Valores de SCS en 5G-NR

μ	$\Delta f = 2^{\mu} \cdot 15 \text{ kHz}$	Prefijo cíclico
0	15 kHz	Normal
1	30 kHz	Normal
2	60 kHz	Normal, Extendido
3	120 kHz	Normal
4	240 kHz	Normal

Mientras que en LTE solo se permitía un valor único de 15 kHz, esta flexibilidad en NR introduce muchas nuevas configuraciones posibles de tramas, anchos de banda, número de subportadoras totales y número de bloques de recursos. En la Tabla 4-2 se expone un resumen de estas posibles combinaciones:

Tabla 4-2 Parámetros principales de la capa física de 5G-NR

Parámetro	0 - 24 GHz	24 - 100 GHz
Forma de onda	Downlink: CP-OFDM; Uplink: CP-OFDM, DFT-s-OFDM	
Ancho de banda por portadora	5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 80, 90, 100 MHz	50, 100, 200, 400 MHz
Espaciado entre subportadoras	15, 30, 60 kHz	60, 120, 240 (no para datos) kHz
Modulación	QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM; uplink soporta $\pi/2$ -BPSK (sólo DFT-s-OFDM)	
Longitud de la trama radio	10 ms	
Duración de la subtrama	1 ms (alineamiento cada 1 ms)	
Modo dúplex	TDD, FDD	TDD

En 5G-NR se tienen 14 símbolos por *slot*. Según el valor de SCS se necesitará un número distinto de *slots* para formar una subtrama de 1 ms, una trama radio la conforman 10 subtramas con una duración total de 10 ms. En las Figuras 4-4 y 4-5, así como en la Tabla 4-4 se pueden ver varias configuraciones de *slots* y *frames*, además de consultar todas las posibilidades disponibles:

Tabla 4-3 Parámetros de la trama de 5G NR

μ	N_{symb}^{slot}	$N_{slot}^{frame,\mu}$	$N_{slot}^{subframe,\mu}$	T_{slot}	Min PRBs	Max PRBs	BW_{min} / BW_{max} (MHz)	N_{symb}
0	14	10	1	1 ms	24	275	4.32 – 49.5	140
1	14	20	2	0.5 ms	24	275	8.64 – 99	280
2	14	40	4	0.250 ms	24	275	17.28 - 198	560
3	14	80	8	0.125 ms	24	275	34.56 - 396	1120
4	14	160	16	0.0625 ms	24	138	69.12 - 397.44	2240

La longitud de cada símbolo (incluido el CP) para un SCS de 15 kHz es igual a la suma de los correspondientes 2^μ símbolos de cada tamaño de SCS superior como puede verse en la Figura 4-4. Además, aparte del primer símbolo OFDM en cada 0.5 ms, todos los símbolos dentro de 0.5 ms tienen la misma longitud. Los elementos de recursos se agrupan en bloques de recursos físicos (PRB), cada PRB contiene 12 subportadoras. Por otro lado se espera poder ampliar el número de símbolos de las modulaciones para ciertos escenarios hasta una 1024-QAM.

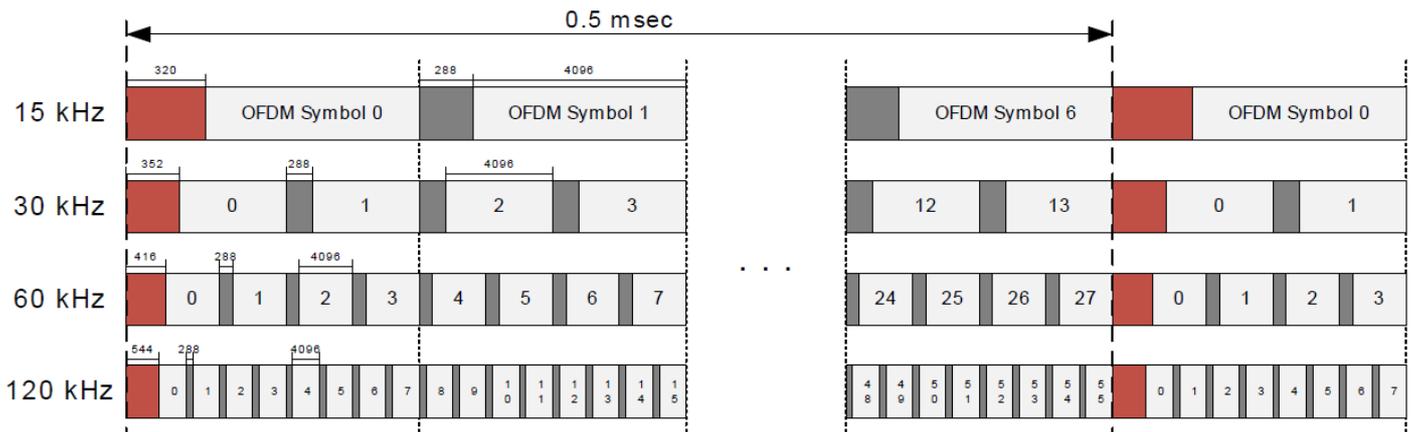


Figura 4-4 Ejemplo de numerología con CP normal

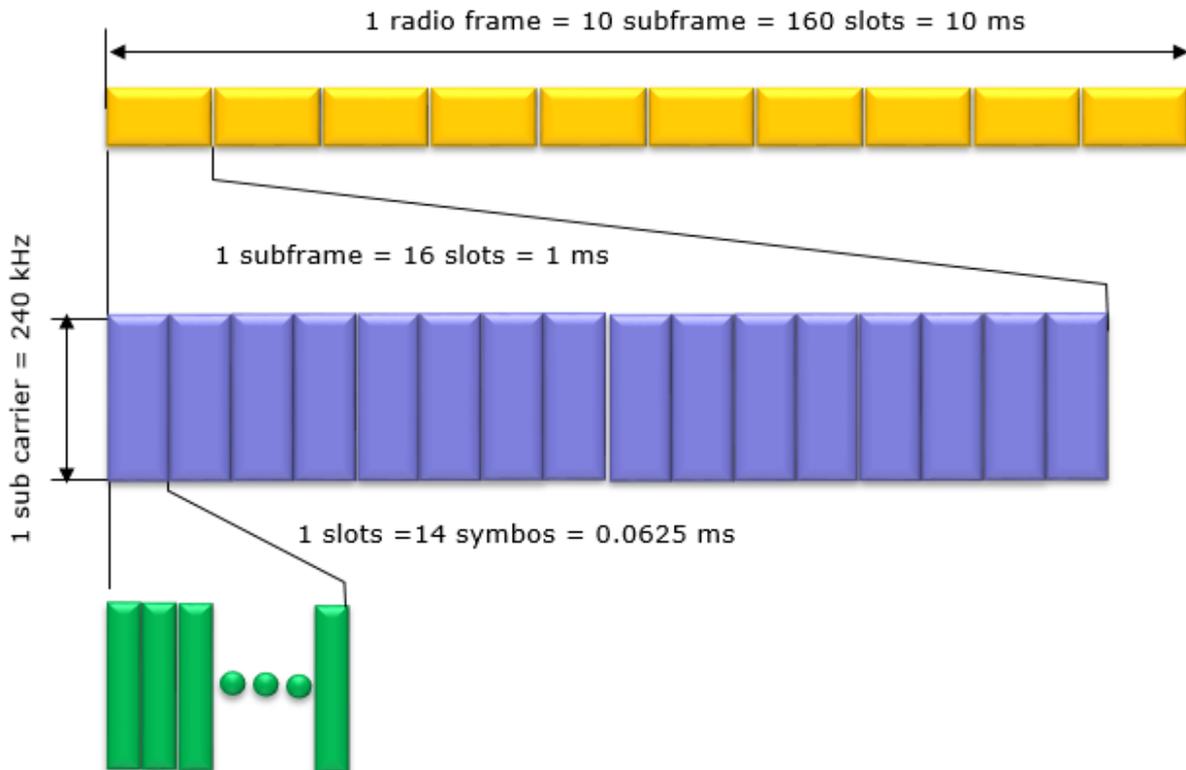
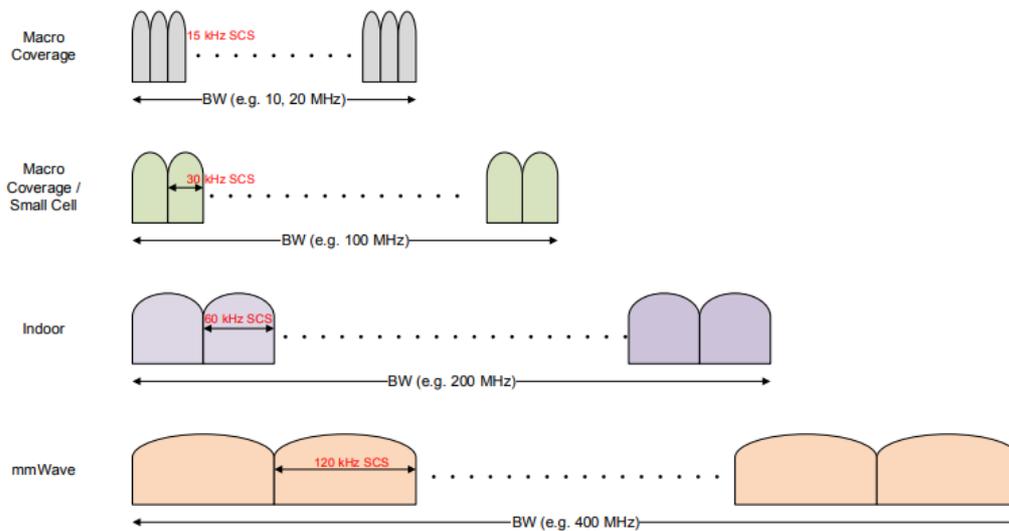


Figura 4-5 Ejemplpo de trama para $\mu = 4$

Por último, en la Figura 4-6 se representan distintas configuraciones de los parámetros de 5G-NR para distintas situaciones y servicios que permiten evidenciar las ventajas que ofrece la flexibilidad en la capa física. Para cada escenario se requiere una implementación diferente para obtener una mayor eficiencia:

Scalable NR Numerology



© Nokia 2017

NOKIA

Figura 4-6 Ejemplo de escenarios de uso para 5G-NR con diferentes configuraciones de parámetros de la capa física

4.4 Forma de onda para 5G

Acabamos de hacer un repaso de la capa física de los dos últimos estándares en comunicaciones móviles y en la forma de onda que utilizan, OFDM. Ahora debemos plantearnos una pregunta clave: ¿podemos utilizar OFDM como forma de onda para las redes 5G y obtener un buen rendimiento y eficiencia para todos los escenarios de uso? En este último apartado se hará un revisión de las características positivas y negativas de OFDM y lo compararemos con las necesidades que debe cubrir la próxima forma de onda para alcanzar los objetivos marcados para las redes 5G.

4.4.1 Ventajas e inconvenientes de OFDM

Es evidente que, aunque estemos en busca de nuevas formas de onda para los próximos sistemas de comunicaciones móviles, OFDM fue elegido para desempeñar esta función por presentar aspectos muy positivos para estos sistemas. Las principales ventajas que ofrece OFDM y sus variantes de acceso múltiple son las siguientes:

- **Eficiencia espectral:** OFDM aprovecha de forma muy eficiente el espectro disponible para transmitir. Esto se debe a que, a pesar de ser una señal *multi-carrier*, no tiene que dejar espacios de guarda entre subportadoras dentro del espectro (véase la Figura 4.7). La definición de la señal OFDM hace que sus portadoras sean ortogonales entre sí, permitiendo que se solapen en el dominio de la frecuencia sin causar ningún problema a la señal y optimizando su ancho de banda.
- **Robustez frente a la propagación multirrayecto y transmisor y receptor de baja complejidad:** tanto receptor como transmisor se implementan mediante esquemas de FFT e IFFT como vimos anteriormente. Estos esquemas son muy sencillos y eficientes de construir. Además, es sencillo realizar una ecualización del canal para combatir los desvanecimientos provocados por el multirrayecto. El multirrayecto se debe a que la señal se encuentra con varios obstáculos llegando al receptor por numerosos caminos diferentes añadiendo distorsión a la señal transmitida originalmente. El receptor observa la suma de varias copias de la misma señal, pero repetida varias veces y con distintos retardos en el tiempo.

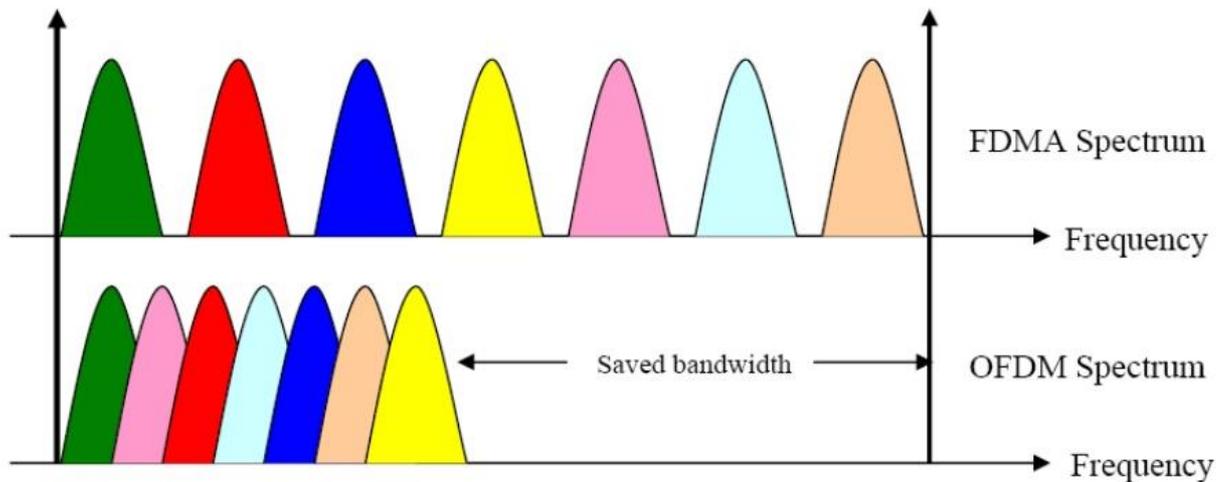


Figura 4-7 Representación de la eficiencia espectral de OFDM

Para neutralizar este efecto, OFDM añade a cada símbolo transmitido un prefijo cíclico (CP) para que los tiempos de trama se cumplan. Con el prefijo cíclico se evita que haya ISI (*InterSymbol Interference*) porque solo se fija en la parte útil (IFFT length) y se deja margen para que los retardos del multirrayecto no se metan en el siguiente símbolo y provoquen ISI. Además, el CP también protege la señal ante ICI (*InterCarrier Interference*).

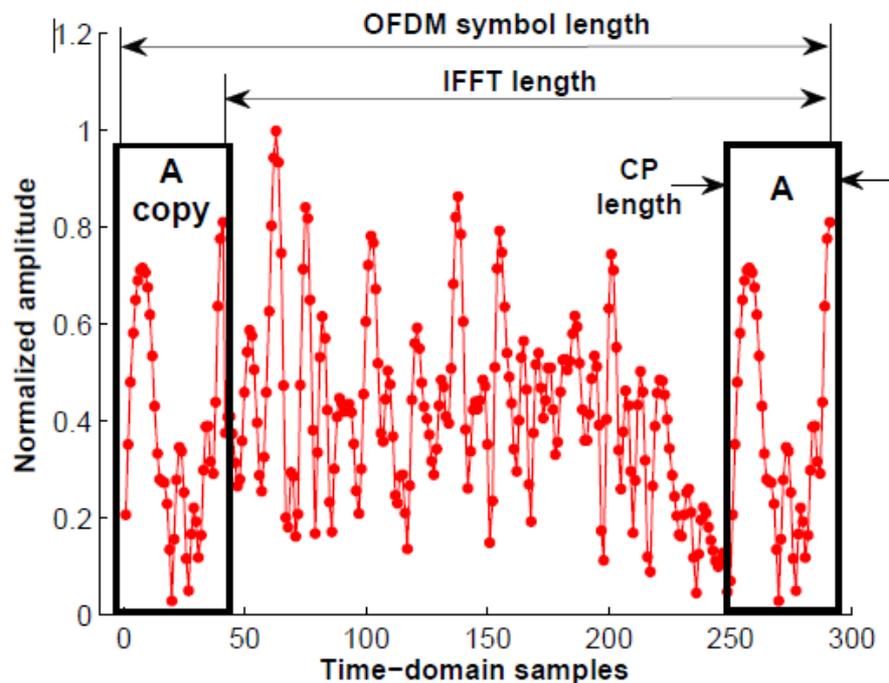


Figura 4-8 Esquema de un símbolo OFDM con CP en el dominio del tiempo

- Interferencia entre portadoras (ICI): se produce cuando al observar una de las portadoras a una frecuencia concreta no se realiza en la frecuencia central exacta de la señal, provocando la pérdida de ortogonalidad con el resto de las portadoras e introduciendo una interferencia. Si hay offset en frecuencia, observamos una componente de frecuencia que está mal y la demodulación será incorrecta.

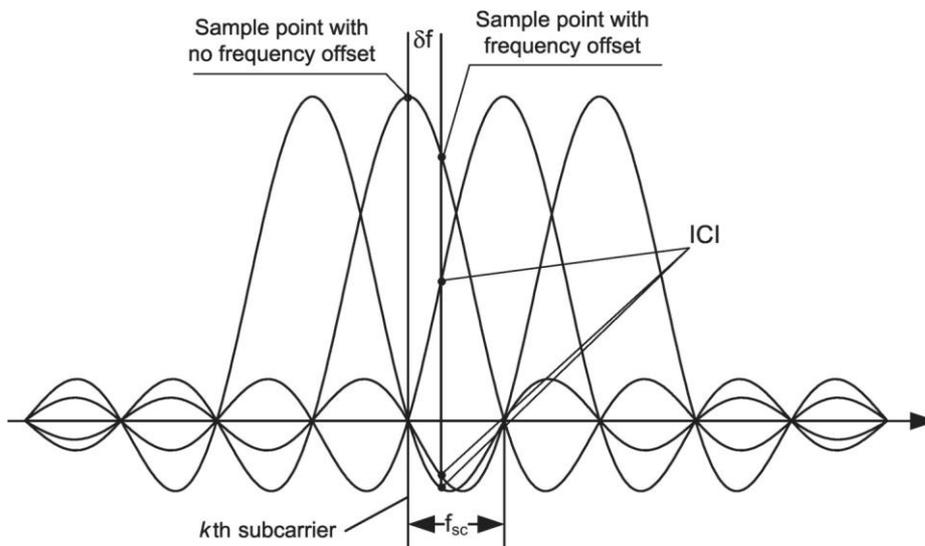


Figura 4-9 Esquema del problema de ICI en OFDM

- Interferencia entre símbolos (ISI): sucede cuando al receptor llegan copias exactas del mismo símbolo que solo se diferencian en un retardo, debido a que han recorrido caminos hasta el receptor.

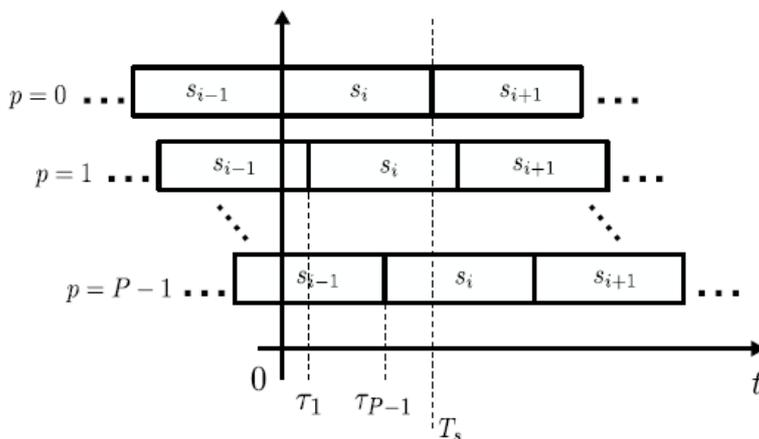


Figura 4-10 Esquema del problema de ISI en OFDM

En la Figura 4-11 podemos ver como resuelve ambos problemas tanto ISI como ICI OFDM añadiendo el prefijo cíclico a los símbolos:

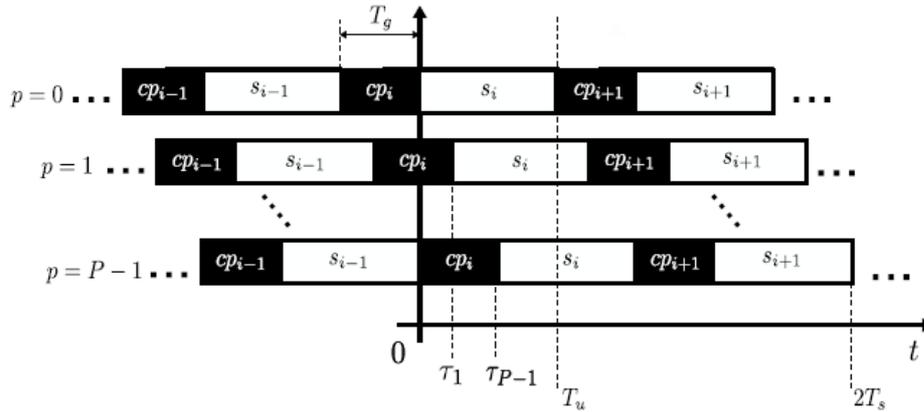


Figura 4-11 Tramas OFDM en el receptor con CP

- Programación de múltiples usuarios: OFDM permite una asignación dinámica del ancho de banda a los usuarios. Se asignan distintas subportadoras a cada usuario que pueden cambiar cada cierto tiempo dando lugar a un uso flexible del espectro en función de las necesidades. Esta flexibilidad aumenta aún más usando OFDMA, ya que podemos asignar bloques de recursos (PRB) a cada usuario incluso utilizando subportadoras no contiguas en frecuencia.

Todas estas cualidades hacen de OFDM una señal muy eficiente para las comunicaciones móviles ya que aporta grandes ventajas en los puntos clave de la comunicación. Sin embargo, no todo es bueno en OFDM, ya que las ventajas que ofrece incluyen ciertos aspectos negativos que podrían hacer incompatible OFDM con algunos de los escenarios de uso de 5G.

Las principales desventajas de OFDM son:

- CP *overhead*: la adición del prefijo cíclico en el símbolo OFDM para evitar los problemas generados por el multitrayecto introduce un inconveniente importante. El prefijo cíclico se forma copiando los bits del final de cada símbolo, por tanto, estamos enviando información redundante en cada símbolo reduciendo la eficiencia de la transmisión. El porcentaje de redundancia de la señal se puede expresar como:

$$\beta_{overhead} = \frac{T_g}{T_g + T_u}$$

donde T_g es el tiempo que dura el prefijo cíclico y T_u el tiempo que dura el símbolo OFDM excluyendo el prefijo cíclico o tiempo útil. Con las configuraciones de LTE para OFDM se obtienen *overheads* (porcentaje de bits que se repiten en cada símbolo) de 6.6% ó 7.2 %. Esto limita considerablemente la eficiencia en capacidad y potencia de la transmisión.

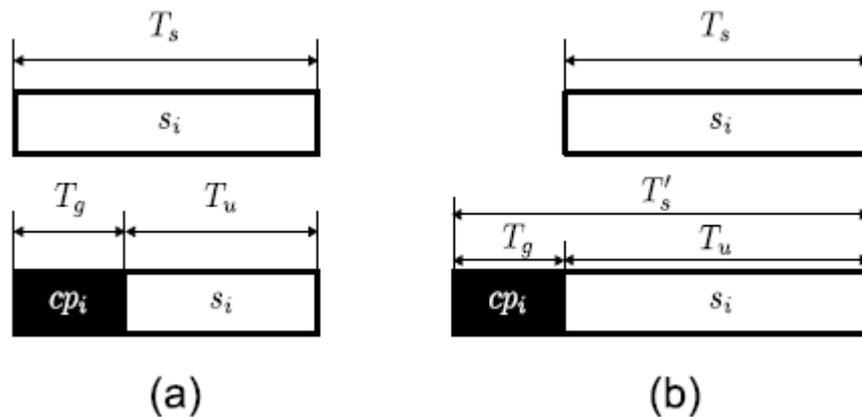


Figura 4-12 Tiempo de guarda y tiempo útil de un símbolo OFDM con CP

- Sensibilidad a la frecuencia y a las compensaciones de tiempo (*timing offsets*): si el transmisor y el receptor no usan exactamente la misma frecuencia, la ortogonalidad de OFDM se pierde, causando ICI. Desviaciones del oscilador local (cambios de voltaje/temperatura) o el ruido de fase pueden causar estas discrepancias de frecuencias entre transmisor y receptor originando las desviaciones en frecuencias y finalmente la ICI.
- Valor elevado de la PAPR (relación potencia de pico a potencia media): debido al gran número de subportadoras que transmitimos en OFDM, sucede que en cierto instante muchas subportadoras pueden alcanzar el mismo valor de fase aumentando considerablemente la potencia pico a la salida. Esto genera una gran diferencia entre la potencia pico y la potencia media de nuestra señal, creando así un factor de cresta que no es beneficioso para nuestra transmisión. SC-FDMA es como explicamos anteriormente una variación de OFDMA que ayuda a reducir en parte este problema, aunque no es una solución completa para 5G.
- Recrecimiento espectral: las señales transmitidas tienen lóbulos fuera de la banda que se introducen en las frecuencias de las otras subportadoras. Además, los símbolos OFDM consecutivos son independientes lo que implica una discontinuidad en el dominio del tiempo entre ellos. Y a su vez, esta discontinuidad en el tiempo produce una caída exponencial en el dominio de la frecuencia desde el límite de la banda ocupada por la señal transmitida, que puede llegar a ocupar los canales adyacentes. Si aplicamos una ventana en el dominio del tiempo podemos suavizar la transición entre los símbolos consecutivos, lo que hace más vertical la caída del espectro fuera de su ancho de banda. Esta técnica, sin embargo, reduce la calidad de la señal y produce un EVM (*Error Vector Magnitude*) mayor. Para reducir la potencia en los canales adyacentes, conocida como OOB (*Out Of Band*), se suelen mantener anchos de banda de guarda entre los diferentes canales. En la Figura 4-13 se pueden ver los lóbulos laterales que afectan a los canales adyacentes en una OFDM de LTE.

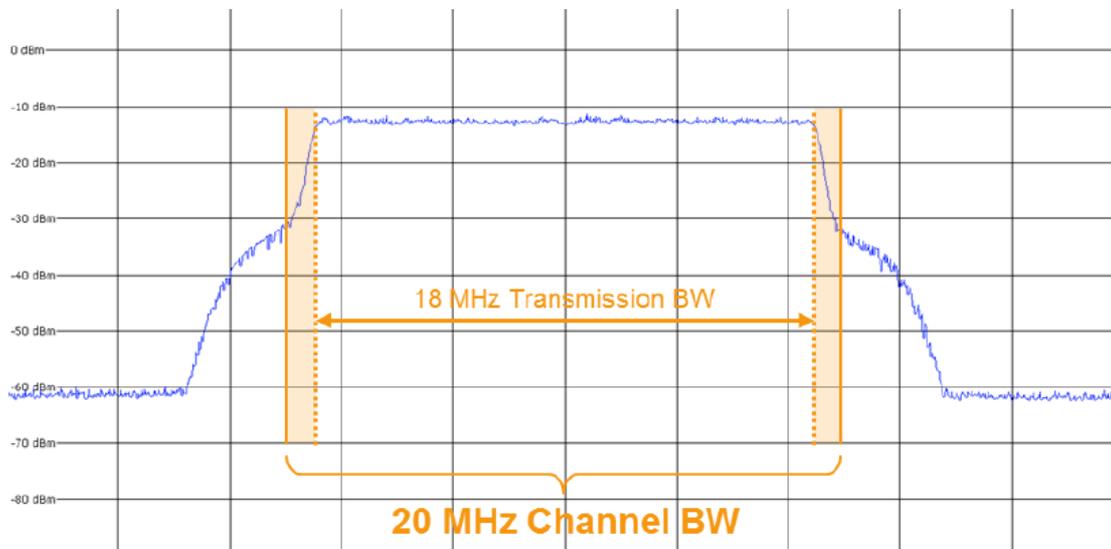


Figura 4-13 Espectro de potencia de señal de enlace descendente LTE de 20 MHz

4.4.2 Principios generales de diseño para la capa PHY / MAC de 5G

Una forma de onda ideal para los sistemas 5G deberá ser lo suficientemente flexible para soportar varios escenarios con diferentes tipos de tráfico, como son los móviles de banda ancha aumentada eMBB (*enhanced Mobile BroadBand*), las comunicaciones masivas entre dispositivos mMTC (*massive Machine Type Communications*) y comunicaciones muy fiables de baja latencia URLLC (*Ultra Reliable Low Latency Communications*) en diferentes entornos (rural, urbano, interiores) y una amplia gama de velocidades de desplazamiento. Por todo ello debería cumplir los siguientes requisitos [6]:

- Mantener la ortogonalidad entre las portadoras para que los problemas de ICI sean los mínimos posibles.
- Los *timings* de la señal, tanto en frecuencia como en tiempo, deben ser estrictos de forma que se evite la ISI y la ICI causadas por la dispersión temporal y el efecto Doppler. La correcta ubicación de la onda en el tiempo es clave también para reducir lo máximo posible la latencia en las comunicaciones.
- Máxima eficiencia espectral (bits/s/Hz). La forma de onda debe aprovechar al máximo su ancho de banda disponible.

Desde el punto de vista de la teoría de la información, no es posible alcanzar todos estos objetivos de forma simultánea, ya que la mejora en un aspecto empeoraría otro. La solución se encuentra en definir una forma de onda de compromiso, que mejore un aspecto concreto (tasa de bit, eficiencia espectral, capacidad, ortogonalidad, . . .) dejando a un lado el resto.

La idea principal al respecto en 5G propone reducir las exigencias de ortogonalidad y exactitud en la sincronización tanto temporal como en frecuencia que son claves en LTE con OFDM. Para ello, se estudian formas de ondas derivadas de OFDM que consiguen mejorar las características de eficiencia aumentando los problemas de ISI e ICI, pero controlando estos efectos mediante técnicas de filtrado en transmisión y recepción. En el siguiente capítulo hablaremos de algunas de las formas de onda candidatas para 5G haciendo hincapié en UFMC, forma de onda motivo del trabajo.

5 FORMAS DE ONDA CANDIDATAS PARA 5G

Las nuevas formas de onda propuestas para 5G se conocen como formas de onda candidatas. La idea fundamental detrás de estas formas de onda es lidiar con las desventajas que posee OFDM para los escenarios de 5G, tratando de conservar sus ventajas en la medida de lo posible.

Existen dos variantes dentro de las formas de onda candidatas: las formas de onda derivadas de OFDM y las formas de onda no derivadas de OFDM. La opción con más fuerza actualmente de estas últimas es BFDM (*Bi-Orthogonal Frequency Division Multiplexing*). En este trabajo nos centraremos en las formas de onda que provienen de OFDM mediante mejoras o modificaciones de esta y compararemos su rendimiento respecto al de OFDM.

Las formas de onda candidatas derivadas de OFDM son:

1. GFDM (*Generalized Frequency Division Multiplexing*).
2. FBMC (*Filter Bank MultiCarrier*).
3. UFMC (*Universal Filtered MultiCarrier*).

Describiremos brevemente las dos primeras para centrarnos posteriormente en UFMC, su implementación y en el siguiente capítulo los resultados obtenidos en el laboratorio realizando medidas con esta forma de onda.

5.1 Formas de onda candidatas derivadas de OFDM

Como comprobamos en el capítulo anterior, OFDM presenta ciertos obstáculos para ser la forma de onda de 5G. Sin embargo, OFDM ofrece numerosas ventajas para las comunicaciones móviles. Es por ello que se estén estudiando y desarrollando nuevas formas de onda que intenten modificar en ciertos aspectos una señal OFDM para reducir el alcance de sus desventajas o eliminarlas por completo, al mismo tiempo que se intenta conservar en la medida de lo posible sus virtudes.

5.1.1 GFDM

GFDM es un sistema de modulación multiportadora no ortogonal con filtrado individual de cada subportadora, mediante un filtro prototipo configurable individualmente desplazado de manera circular en tiempo y frecuencia. Debido a que una de sus características principales es su bajo nivel de emisiones OOB, es particularmente atractivo en escenarios con espectro fragmentado con bandas de frecuencia no contiguas y con estrictas restricciones de máscara espectral [6].

La transmisión se realiza mediante bloques compuestos por subportadoras y subsímbolos que no tienen que estar contiguos en el espectro necesariamente. El modulador GFDM recibe el vector de N elementos \vec{d} , el cual descompone en K subportadoras con M subsímbolos cada una. Esto supone que, a diferencia de OFDM, no se genera un CP para cada símbolo, sino que se utiliza uno común para el bloque. Por ese motivo, la señal moduladora toma la forma de un ciclo de una señal periódica de periodo $K \cdot M$. El vector resultante \vec{d} contiene $N = K \cdot M$ elementos en el que el elemento $d_{k,m}$ corresponde con el dato transmitido en la subportadora k del subsímbolo m del bloque de elementos. Cada subsímbolo pasa por un banco de filtros compuesto por el pulso utilizado para transmitir cada dato desplazado circularmente en tiempo. En la Figura 5-1 se representa un ejemplo de modulador para GFDM [7] y en la Figura 5-2 se comparan los bloques de recursos de OFDM y GFDM.

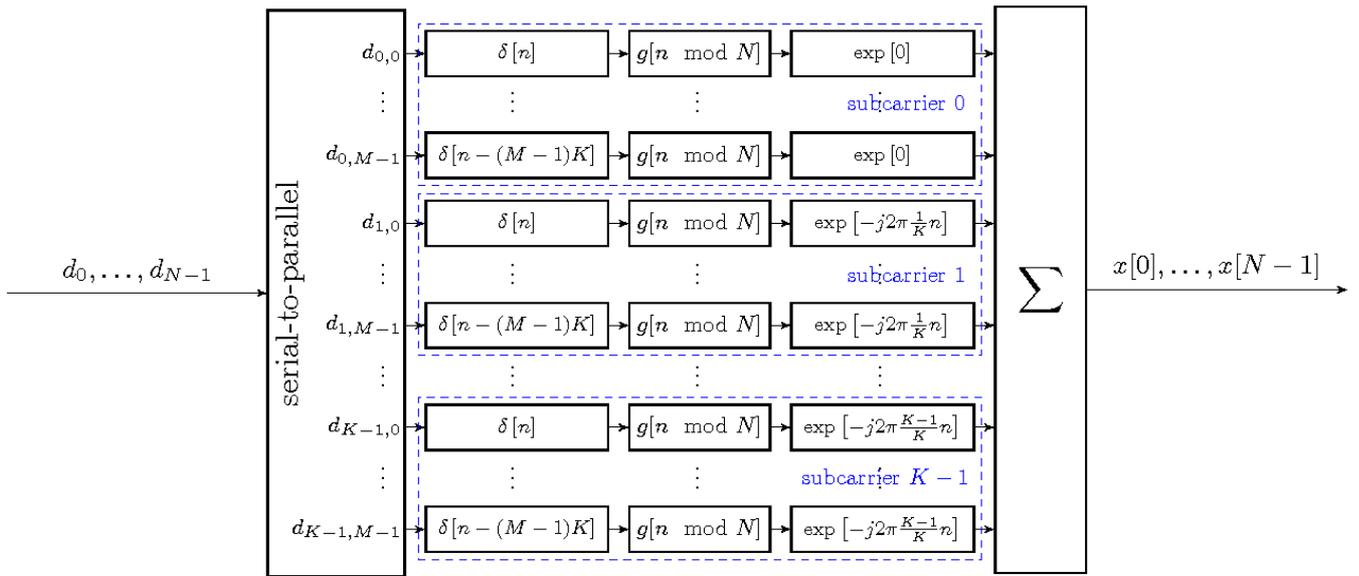


Figura 5-1 Modulador GFDM

El problema de GFDM es la pérdida de ortogonalidad entre subportadoras que se produce porque la función de transferencia de los filtros altera el espectro de la señal. Los filtros que mejor se desenvuelven en esta forma de onda son filtros RRC (*Root Raised Cosine*). Aún así, esta pérdida de ortogonalidad se ve reflejada en una interferencia entre subportadoras que empeora la BER (*Bit Error Rate*). Una señal GFDM, por tanto, puede ser parametrizada por los valores de K , M y α (factor de *roll-off* del filtro RRC).

La duración del bloque o “trama” GFDM puede adaptarse a las necesidades del servicio a proporcionar. En algunos casos esta duración debe ser muy corta para cumplir el objetivo de latencia de 5G.

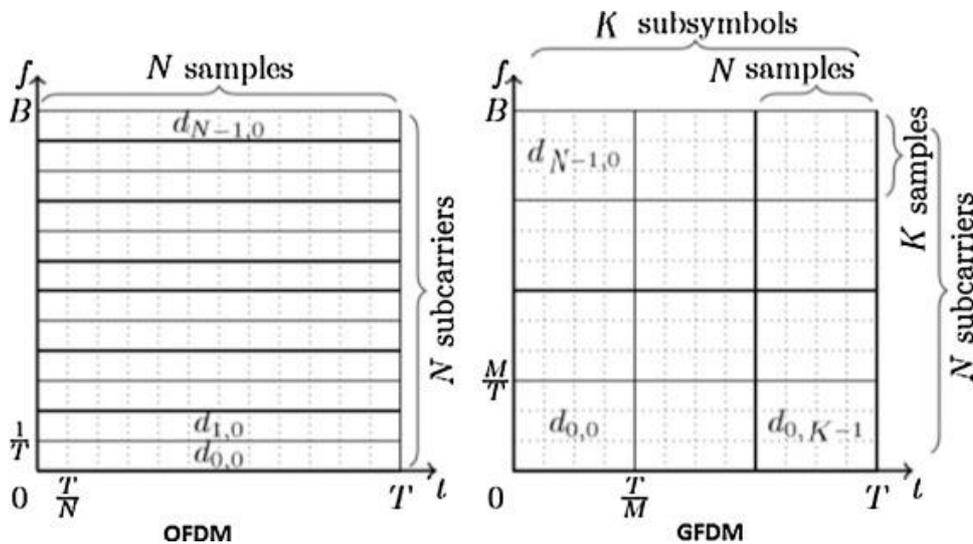


Figura 5-2 Comparación bloques de recursos de OFDM y GFDM

En la recepción existen tres posibles soluciones para GFDM [7]:

- Matched Filter (MF): este método maximiza la relación señal a ruido (SNR) por subportadora, pero introduce interferencia cuando se utilizan pulsos transmisores no ortogonales. Los pulsos que normalmente son utilizados en GFDM son RC o RRC, los cuales se emparejan con ellos mismos.
- Zero Forcing (ZF): al contrario que en MF, esta opción elimina la interferencia a costa de realzar el ruido. Por otro lado, existen casos en los que este método no es aplicable ya que la matriz A puede no tener inversa
- Mínimo error cuadrático medio (MMSE): esta opción establece un compromiso entre la interferencia y el realce del ruido. Se debe tener en cuenta que con MMSE el canal es ecualizado en el mismo proceso de recepción y, por lo tanto, no es necesario un bloque de Zero Forcing.

A continuación, se comparan los espectros de una señal GS-GFDM, es decir, la señal GFDM, pero añadiendo un subsímbolo a 0 al principio, una señal GFDM y una señal OFDM:

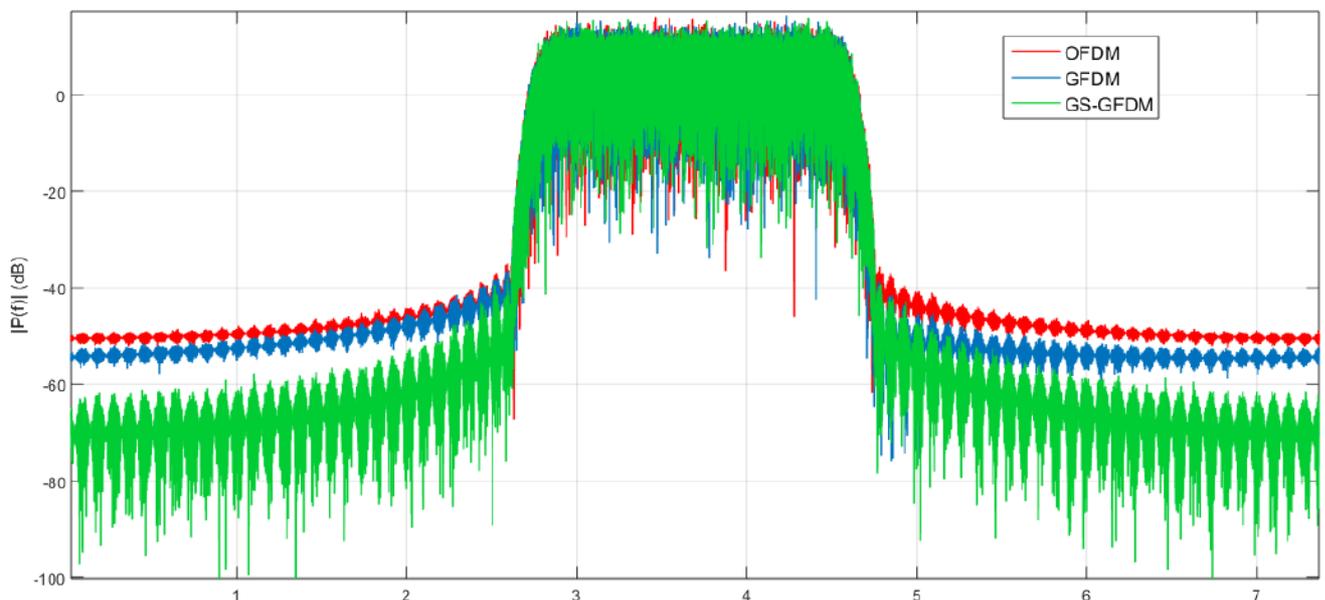


Figura 5-3 Espectros GFDM, GS-GFDM y OFDM obtenidos en simulación.

5.1.1.1 Ventajas y desventajas de GFDM

GFDM presenta las siguientes mejoras e inconvenientes respecto OFDM [8]:

Ventajas:

- PAPR menor que en OFDM.
- Baja radiación fuera de banda (OOB).
- Acceso múltiple de usuarios dinámico en el dominio de la frecuencia y el tiempo comparable a OFDM.
- Agregación de espacios en blanco incluso en regiones de espectro muy fragmentadas.
- Transmisión basada en bloques que utiliza la inserción de prefijos cíclicos y una ecualización eficiente basada en FFT.

Desventajas:

- Diseño del receptor complicado.
- La cancelación de interferencia sucesiva para eliminar ICI / ISI del filtrado es necesaria.
- Estimación del tiempo de símbolo (STO), estimación de la frecuencia de portadora (CFO).
- Para suprimir la interferencia entre subportadoras, se necesitan filtros de alto orden y *tail biting* [9].

5.1.2 FBMC

En OFDM se utiliza el prefijo cíclico para evitar la ISI que causa la pérdida de ortogonalidad entre subportadoras. El enfoque utilizado por FBMC para superar este problema es mantener la duración del símbolo inalterada, evitando así la introducción de cualquier sobrecarga de tiempo, y hacer frente a la superposición entre los símbolos de multiprotadora adyacentes en el dominio del tiempo agregando un filtro adicional en la transmisión y la recepción, además de los bloques IFFT / FFT [4].

Esto se hace filtrando cada salida de la FFT mediante una versión con desplazamiento de frecuencia de un filtro de paso bajo $p(t)$, denominado filtro "prototipo". Este filtrado adicional, junto con la operación IFFT / FFT, forman una estructura de banco de filtros, donde el filtro prototipo está diseñado para suprimir significativamente la ISI [4]. En las Figuras 5-4 y 5-5 se puede observar el banco de filtros sobre cada subportadora y el filtro prototipo respectivamente.

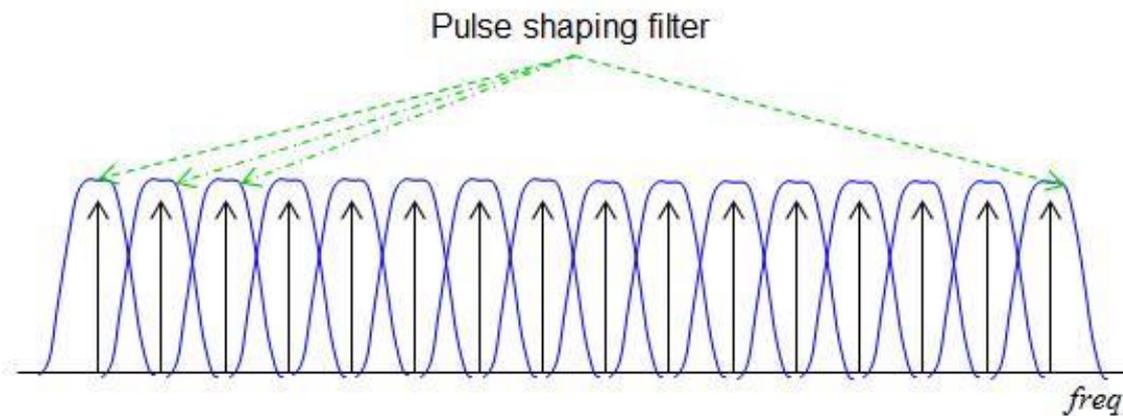


Figura 5-4 Banco de filtros en frecuencia para FBMC

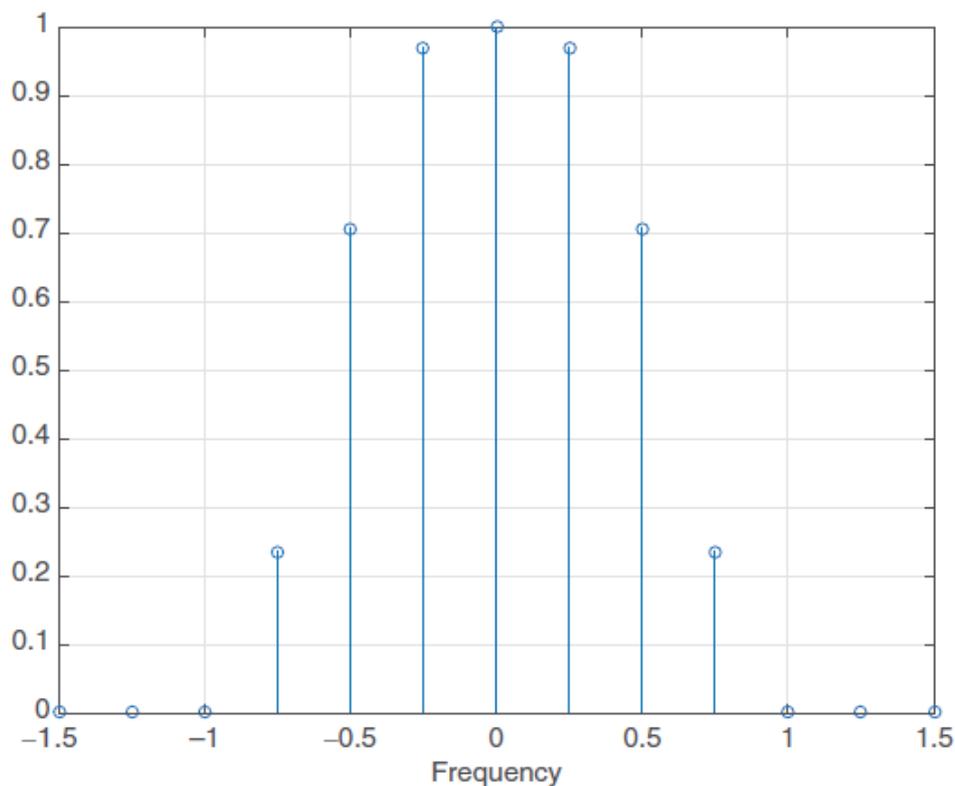


Figura 5-5 Muestras del filtro prototipo $p(t)$ en el dominio de la frecuencia

Se define y se configura la función de transferencia HPF del filtro prototipo (PF) para una subportadora de referencia. Las funciones de transferencia de los filtros de las subsiguientes subportadoras se obtienen de la función HPF mediante desplazamientos de frecuencia, ya que las subportadoras poseen idéntico espectro, solo que desplazado en frecuencia. Por ello, puede integrarse el procesamiento IFFT con la generación de las respuestas impulsivas de los filtros en la llamada red polifase (PPN-FFT, una técnica que permite mantener el tamaño de la FFT, pero añadiendo filtros digitales) [6]. El esquema PPN-FFT puede implementarse agregando los desplazamientos de fase $e^{-j2\pi p f} H_p(f)$ en serie con la operación IFFT / FFT habitual realizada en esquemas OFDM convencionales.

La respuesta impulsiva del filtro prototipo tiene una longitud $L=2K-1$, siendo K un parámetro de diseño conocido como factor de solapamiento. De esta forma el filtro cumple el criterio de Nyquist y se puede definir $K = L/M$ donde M es el número total de subportadoras o subcanales. El procesamiento conjunto requiere una IFFT de tamaño $K \cdot M$. Cuanto más alto es el valor de K , mayor es la atenuación fuera de banda, pero también lo es la complejidad.

Con esta solución, las portadoras pares e impares no interfieren entre sí y solo tenemos que conseguir una ortogonalidad entre subportadoras contiguas y no en todas como en OFDM. Para mantener la ortogonalidad en el dominio real e imaginario, se utiliza *Offset-QAM* (O-QAM) y se aplica a los símbolos de datos modulados. La O-QAM se logra retardando las componentes en fase de un sistema QAM en la mitad de la longitud del símbolo $T/2$ con respecto a las componentes en cuadratura. Si el retardo de tiempo se aplica a la parte en fase de una portadora, se aplica a la parte en cuadratura de sus vecinas, la interferencia se reduce a cada una de las segundas portadoras. El receptor O-QAM cancela la ICI al ignorar la parte del símbolo recibido que no lleva los datos. El uso de O-QAM elimina la necesidad de tiempos de guarda y prefijo cíclico que, por lo tanto, es opcional en FBMC [8], aumentando la eficiencia espectral.

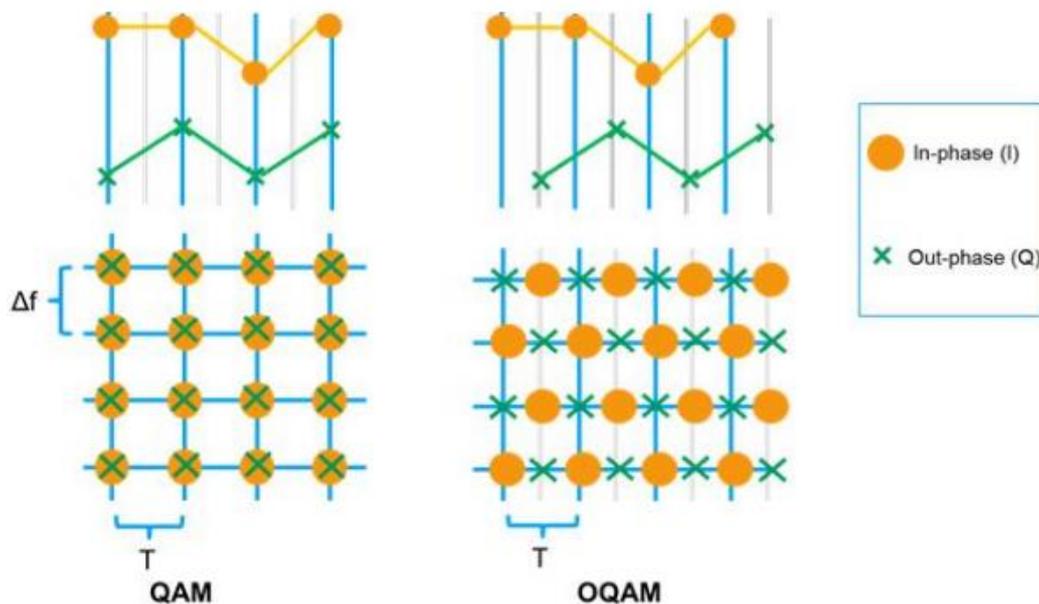


Figura 5-6 Quadrature Amplitude Modulation (QAM) vs Offset QAM (O-QAM).

Por último, en la Figura 5-7 se representan en comparación los espectros de OFDM y FBMC:

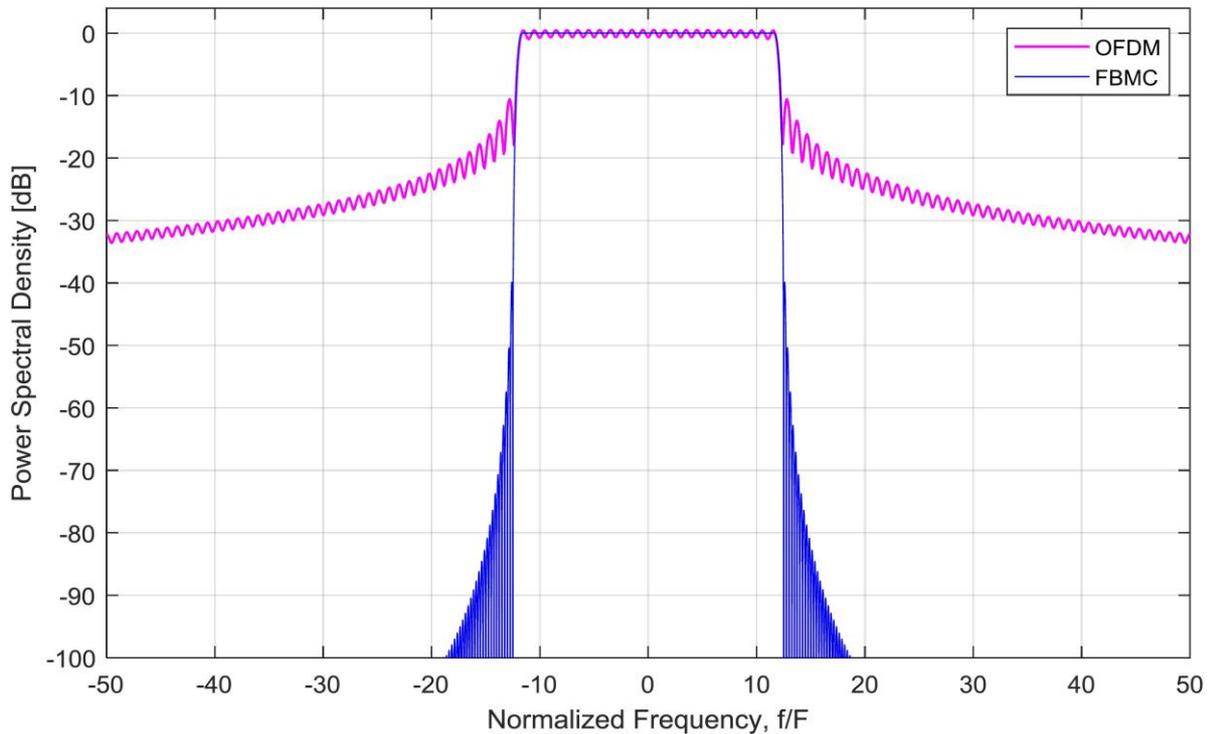


Figura 5-7 Espectro de FMBC respecto al de OFDM

5.1.2.1 Ventajas y desventajas de FBMC

FBMC presenta las siguientes mejoras e inconvenientes respecto OFDM [8]:

Ventajas:

- Mayor eficiencia espectral y eficiencia de transmisión al no utilizar prefijo cíclico.
- Muy adecuado para espectro fragmentado o radio cognitiva.
- Robustez frente a la alta movilidad.
- Adaptación eficiente de parámetros básicos como el espaciado entre subportadoras SCS o la duración del símbolo dentro de una banda posible.
- Menor transmisión fuera de banda (OOB) que OFDM.

Desventajas:

- La inserción de subportadoras pilotos para la estimación del canal se vuelve más compleja que en OFDM.
- Los esquemas de MIMO (*Multiple Inputs Multiple Outputs*) son complejos de implementar con FBMC.
- Se necesita una portadora de protección entre usuarios en el enlace ascendente o para la formación de haz de frecuencia selectiva
- Ineficiente para ráfagas cortas debido a largas colas de filtro o para comunicaciones con baja latencia.
- Mayor complejidad computacional.

5.2 Universal Filtered MultiCarrier (UFMC)

La forma de onda candidata Universal Filtered MultiCarrier (UFMC) también conocida como Universal Filtered OFDM (UF-OFDM) consiste en realizar un filtrado a grupos de subportadoras OFDM dividiendo el espectro en subbandas.

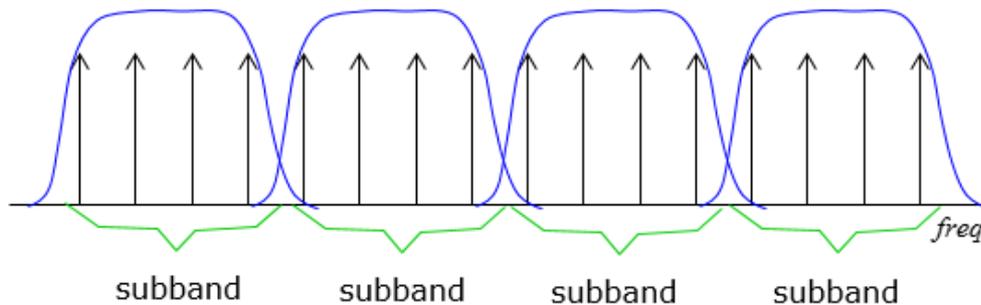


Figura 5-8 Banco de filtros en frecuencia para UFMC

Los parámetros del filtro y el número de portadoras por subbanda son generalmente comunes y definen una señal UFMC. Esto evita el *aliasing*. No obstante, subbandas no contiguas son posibles para permitir una utilización flexible del espectro disponible. Por lo tanto, UFMC puede verse como un compromiso entre OFDM y FBMC que serían casos extremos, donde se intenta recoger lo mejor de cada una y evitar sus desventajas mediante una “generalización” de ambos conceptos. En la Figura 5-9 se encuentra el diagrama de bloques de un transceptor completo de UFMC.

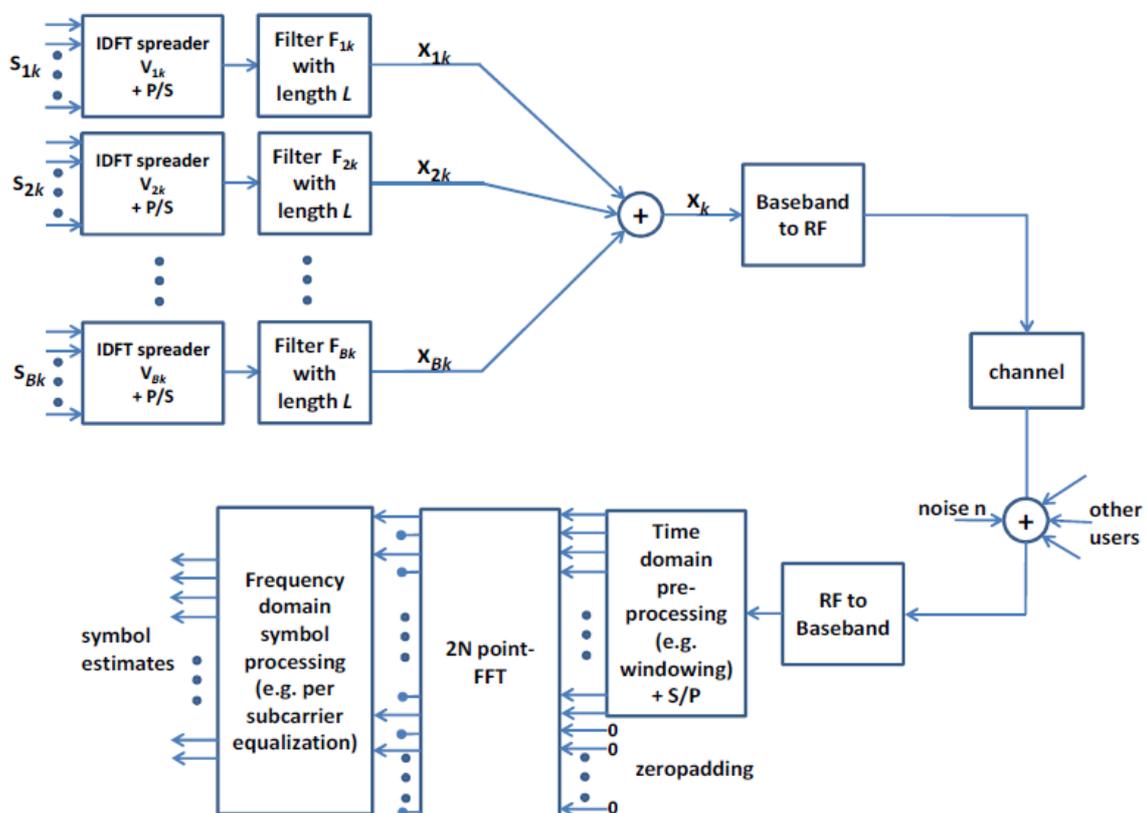


Figura 5-9 Diagrama de bloques de un transceptor UFMC

El vector de transmisión en el dominio de tiempo x_k para un símbolo de multiportadora particular del usuario k es la superposición de las componentes filtradas en cada subbanda, con longitud de filtro L y longitud de FFT N , y puede representarse como:

$$x_k = \sum_{i=1}^B F_{i,k} \cdot V_{i,k} \cdot s_{i,k}$$

Para cada una de las subbandas B , indexadas i , los símbolos QAM complejos, contenidos en $s_{i,k}$, se transforman en el dominio de tiempo por el $V_{i,k}$ de la matriz IDFT. $V_{i,k}$ incluye las columnas relevantes de la matriz de Fourier inversa de acuerdo con la posición de subbanda respectiva dentro del rango de frecuencias disponible y $F_{i,k}$ es una matriz de Toeplitz, compuesta por la respuesta al impulso del filtro, con el que se realiza la convolución lineal. Después de la superposición, la señal suma se sube en frecuencia y se procesa en RF. [10]. $F_{i,k}$ es un parámetro de diseño ajustable a las condiciones de transmisión. Para $L = 1$, UF-OFDM converge a (non CP-) OFDM. Para $n_i = 1$ y $L \gg 1$, UF-OFDM converge a FBMC-FMT (Filtered Multi-Tone). Hay que destacar también, que no existe superposición de tiempo entre los símbolos UFMC consecutivos. La duración del símbolo es de $N + L - 1$ muestras generada por la longitud del filtro y el tamaño de la FFT.

A continuación, se describirán haciendo referencia a la Figura 5-9 tanto el transmisor como el receptor UFMC implementados mediante la herramienta MATLAB. De esta forma, nos ayudaremos del código para explicar el funcionamiento teórico de los distintos bloques. Finalmente, se procederá a comparar la forma de onda UFMC respecto a OFDM y FBMC que podríamos considerar como sus contendientes en la lucha hacia la forma de onda de 5G, además de ser dos casos concretos y extremos de UFMC.

5.2.1 Transmisor

La transmisión de la señal UFMC propuesta se basa en la adaptación del código de [11] basada en [10] y [12] para adaptarlo a una señal OFDM de 5G-NR y poder comparar sus prestaciones de manera tanto software como en el laboratorio. El código completo, tanto de generación como de demodulación y análisis, de ambas formas de onda (UFMC y OFDM 5G-NR) se encuentra publicado en el Anexo A de este documento.

En primer lugar, definimos los parámetros característicos de la forma de onda. En nuestro caso, utilizaremos 16-QAM y una longitud del filtro $L = 43$. El tamaño de la FFT, N , será de 512 o 1024 en función de los valores que otorguemos al número de bloques de recursos (NPRB). Cada PRB está formado por 12 subportadoras como en 5G-NR y tendremos 7 símbolos por cada slot de información. El uso de CP se descarta al no ser necesario, mejorando así la eficiencia espectral. En la simulación se han utilizado como variables el número de PRBs, el número de subbandas y la distancia entre subportadoras para evaluar distintos casos (estos valores se piden como variables de entrada en la función que genera la señal). Estos parámetros y los resultados obtenidos con ellos se discutirán con más profundidad en el capítulo de resultados que sigue a este.

```
%% Inicialización de parámetros

% similar to cyclic prefix length // longitud del filtro
filterLen = 43;
% atenuacion del filtro en los lobulos exteriores
slobeAtten = 40;
% No. de puntos en la constelación: M
M = 16;
% Numero de bits por simbolo
k=log2(M);
% Numero de símbolos OFDM
Nsymb_OFDM = 7*Nslots;
% Numero de subportadoras activas
Nsubport = NPRB*12;
% Numero de subportadoras totales
Nsubport_total = 2^(nextpow2(Nsubport));
% Numero de puntos de calculo de la FFT
FFT_size = Nsubport_total;
% Numero de simbolos MQAM
Nsymb = Nsubport*Nsymb_OFDM;
% Numero de bits totales
num_bits = Nsymb*k;
% numero de subportadoras por banda nsubbanda*nsubportbanda<= FFT_size
nsubportbanda = Nsubport/nsubbandas;
% para obtener centro de cada banda
subbandOffset = FFT_size/2-nsubportbanda*nsubbandas/2;
% frecuencia de muestreo
fs = Df*FFT_size*ovs;
```

Una vez tenemos definidos todos los parámetros iniciales, el siguiente paso es generar la secuencia pseudoaleatoria de bits que vamos a transmitir y modularlos como una 16-QAM.

```

%% Generación de la secuencia de información de forma aleatoria

stream = RandStream.create('mrg32k3a','NumStreams',1,'Seed',seed);

% secuencia de bits aleatorio generada para transmitir
senal_aleatoria = randi(stream, 2,num_bits,1)-1;

%modulamos la secuencia de bits como una 16-QAM
qamMapper = comm.RectangularQAMModulator('ModulationOrder', ...
M, 'BitInput', true, ...
'NormalizationMethod', 'Average power');
%Símbolos totales a transmitir
X=qamMapper(senal_aleatoria);

```

Seguidamente definimos las matrices que almacenarán por símbolos la información de cada subportadora, así como el filtro prototipo que realizará el filtrado en cada banda. La propuesta de la mayoría de los autores es utilizar un filtro Chebishev de longitudes similares al prefijo cíclico de una OFDM.

```

%% Inicialización de matrices para UFMC

% Filtro chebishev
prototypeFilter = chebwin(filterLen, slopeAtten);
%Matriz para cada simbolo
txSig = complex(zeros(FFT_size+filterLen-1, Nsymb_OFDM));
%Matriz _total
txSig_final = complex(zeros(FFT_size+filterLen-1, Nsymb_OFDM));
%matriz simbolos totales antes de modular
dataTxSymbols = reshape(X,Nsubport,Nsymb_OFDM);

```

Ya tenemos todos los símbolos a transmitir y las matrices para contenerlos una vez sean modulados. Ahora generamos un bucle doble que recorre la matriz de subportadoras total por subbandas y por símbolos. De esta forma dividimos las subportadoras de cada símbolo en el número de subbandas que se desea y a la vez se modulan mediante IFFT y el posterior filtrado de cada subbanda. En concreto, el bucle escoge la subbanda correspondiente y modula y filtra sus subportadoras correspondiente símbolo a símbolo. Una vez a generado la señal correspondiente a una subbanda en todos los símbolos pasa a completar la siguiente hasta alcanzar el número total de subbandas.

La generación de la forma de onda en cada subbanda es exactamente igual que en OFDM con la salvedad que tras la aplicación de la IFFT a las subportadoras de la subbanda se les aplica el filtrado correspondiente. El filtro se adapta al número de subportadoras que se hayan definido para cada subbanda y se va desplazando en frecuencia al tiempo que nos movemos de una subbanda a otra.

```

%% Generación señal UFMC

% Bucle sobre cada subbanda y cada simbolo
for bandIdx = 1:nsubbandas
    for ns=1:Nsymb_OFDM

        %offset de cada subbanda
        offset = subbandOffset+(bandIdx-1)*nsubportbanda;
        %cogemos los simbolos que corresponden a esta subbanda
        symbolsIn=dataTxSymbols((bandIdx-1)*nsubportbanda+1:bandIdx*nsubportbanda,ns);
        %los introducimos en una matriz del tamaño del numero de subportadoras totales
        symbolsInOFDM = [zeros(offset,1); symbolsIn; ...
            zeros(FFT_size-offset-nsubportbanda,1)];

        %se realiza la ifft de los simbolos
        ifftOut = ifft(ifftshift(symbolsInOFDM));

        % El filtro para cada subbanda se desplaza en frecuencia
        bandFilter = prototypeFilter.*exp(1i*2*pi*(0:filterLen-1)/FFT_size* ...

```

```

        ((bandIdx-1/2)*nsubportbanda+0.5+subbandOffset+FFT_size/2) );
    filterOut = conv(bandFilter,ifftOut);

    % Suma de las respuestas de subbanda filtradas para formar la señal de
    % transmision final
    txSig(:,ns) = filterOut;
end
txSig_final = txSig_final + txSig;
end

txSig_final_2 = txSig_final(:);
x = txSig_final_2;
x_2 = txSig_final;

```

Finalmente, se suma la información de cada subbanda para cada símbolo para conformar la señal final y se convierte a vector columna para conseguir que todos los símbolos estén concatenados.

5.2.2 Receptor

El receptor recibe la superposición con ruido de todas las transmisiones de los usuarios. Después de la conversión a banda base, el vector de señal recibido puede procesarse opcionalmente en el dominio del tiempo, por ejemplo, puede aplicarse un enventanado para suprimir la interferencia multiusuario, y tras la conversión al dominio de la frecuencia mediante la FFT (cualquier procedimiento conocido para CP-OFDM es aplicable aquí, por ejemplo, relacionado con la estimación y ecualización del canal) para mejorar la calidad de la señal [10].

El receptor implementado a continuación también sigue el esquema de la Figura 5-9, añadiendo además una ecualización por subbandas. La ecualización es necesaria si queremos contrarrestar el efecto del filtrado desplazado en frecuencia para cada subbanda que afecta negativamente a la hora de demodular los símbolos.

En primer lugar, se inicializan las mismas variables que en el transmisor para detectar la señal transmitida con el mismo valor de esos parámetros. La función *awgn* añade ruido blanco gaussiano a la señal final generada en el transmisor con el código anterior. En caso de que la señal a detectar provenga de una medida real se da a esta función un valor de SNR (*Signal to Noise Ratio*) alto para que no añada aún más ruido al de la propia medida. Además, mediante la función *FFTinterpolate* bajamos la frecuencia de muestreo, que es más alta debido a un sobremuestreo que se le hace a la señal para transmitirla y poder observar sus canales adyacentes en los equipos y en MATLAB.

```

prototypeFilter = chebwin(filterLen, slopeAtten);

txSig_final = reshape(rx, FFT_size, Nsymb_OFDM);
% Add WGN

rxSig = awgn(txSig_final, snr dB, 'measured');

rxSig0 = FFTinterpolate(rxSig, fs, fo);

rxSig1 = reshape(rxSig0, FFT_size+filterLen-1, Nsymb_OFDM);

% Pad receive vector to twice the FFT Length (note use of txSig as input)
% No windowing or additional filtering adopted
yRxPadded = [rxSig1; zeros(2*FFT_size-numel(rxSig1(:,1)), Nsymb_OFDM)];
offset2 = subbandOffset+(1:nsubbandas*nsubportbanda);
for nsimb=1:Nsymb_OFDM
    % Perform FFT and downsample by 2
    RxSymbols2x(:, nsimb) = fftshift(fft(yRxPadded(:, nsimb)));
    RxSymbols(:, nsimb) = RxSymbols2x(1:2:end, nsimb);
    % Select data subcarriers
    dataRxSymbols(:, nsimb) = RxSymbols(offset2, nsimb);
end

```

El proceso después es sencillo, volvemos a pasar de un vector columna a una matriz para separar los símbolos por columnas y realizamos *zero padding* a cada símbolo hasta obtener $2 \cdot N$ FFT subportadoras como longitud de cada símbolo. Posteriormente se realiza la FFT de los símbolos con *zero padding* y se vuelven a ordenar cogiendo la información de la matriz en paso de 2 para volver a tener el tamaño original de la matriz de subportadoras. Por último, seleccionamos las subportadoras con información.

```
% Use zero-forcing equalizer after OFDM demodulation
rxf = [prototypeFilter.*exp(1i*2*pi*0.5*(0:filterLen-1)'/FFT_size); ...
      zeros(FFT_size-filterLen,1)];
prototypeFilterFreq = fftshift(fft(rxf));
prototypeFilterInv = 1./prototypeFilterFreq(FFT_size/2-
floor(nsubportbanda/2)+(1:nsubportbanda));

% Equalize per subband - undo the filter distortion constelacion
for nsimb2=1:Nsymb_OFDM
dataRxSymbolsMat = reshape(dataRxSymbols(:,nsimb2),nsubportbanda,nsubbandas);
EqualizedRxSymbolsMat = bsxfun(@times,dataRxSymbolsMat,prototypeFilterInv);
EqualizedRxSymbols(:,nsimb2) = EqualizedRxSymbolsMat(:);
end

rx = EqualizedRxSymbols(:);
```

A continuación, se crea el ecualizador mencionado anteriormente en función del filtro de Chebishev utilizado para la transmisión y el número de subportadoras por subbanda de la señal UFMC. El ecualizador se aplica después símbolo a símbolo a toda la señal.

```
% Demapping and BER computation
qamDemod = comm.RectangularQAMDemodulator('ModulationOrder', ...
    M, 'BitOutput', true, ...
    'NormalizationMethod', 'Average power');
BER = comm.ErrorRate;

% Perform hard decision and measure errors
rxBits = qamDemod(EqualizedRxSymbols(:));
ber = BER(senal_aleatoria, rxBits);
```

Una vez hemos ecualizado los símbolos podemos demodularlos y calcular la BER comparando los bits obtenidos con la secuencia de bits original.

5.2.3 Características de UFMC

Como hemos comentado con anterioridad, Filtered CP-OFDM (CP-OFDM con un filtrado en todo su ancho de banda para que cumpla máscaras espectrales) y FBMC pueden verse como los dos casos extremos de un paradigma de modulación más general. Mientras que el primero filtra la banda completa, el segundo aplica el filtrado por subportadora. UFMC se introdujo como un nuevo diseño de forma de onda que representa una generalización de este principio dirigido a recopilar las ventajas y evitar las desventajas [10].

Desde este punto de partida podemos analizar las características que presenta UFMC:

- Sus niveles de PAPR son medios. Debido a su compatibilidad, pueden aplicarse los mismos métodos de reducción de esta que en OFDM.
- Además, se puede aplicar cualquier técnica de procesamiento de señal o mejora en general de la transmisión que ya se esté realizando para OFDM. Gracias a la posibilidad de utilizar QAM, UFMC también soporta MIMO y transmisiones CoMP (*Coordinated MultiPoint*).
- La emisión fuera de banda (OOB) es muy baja y alcanza los objetivos que se persiguen en este ámbito respecto a OFDM y FBMC. Podemos ver el espectro de la señal generada anteriormente en la Figura 5-10.

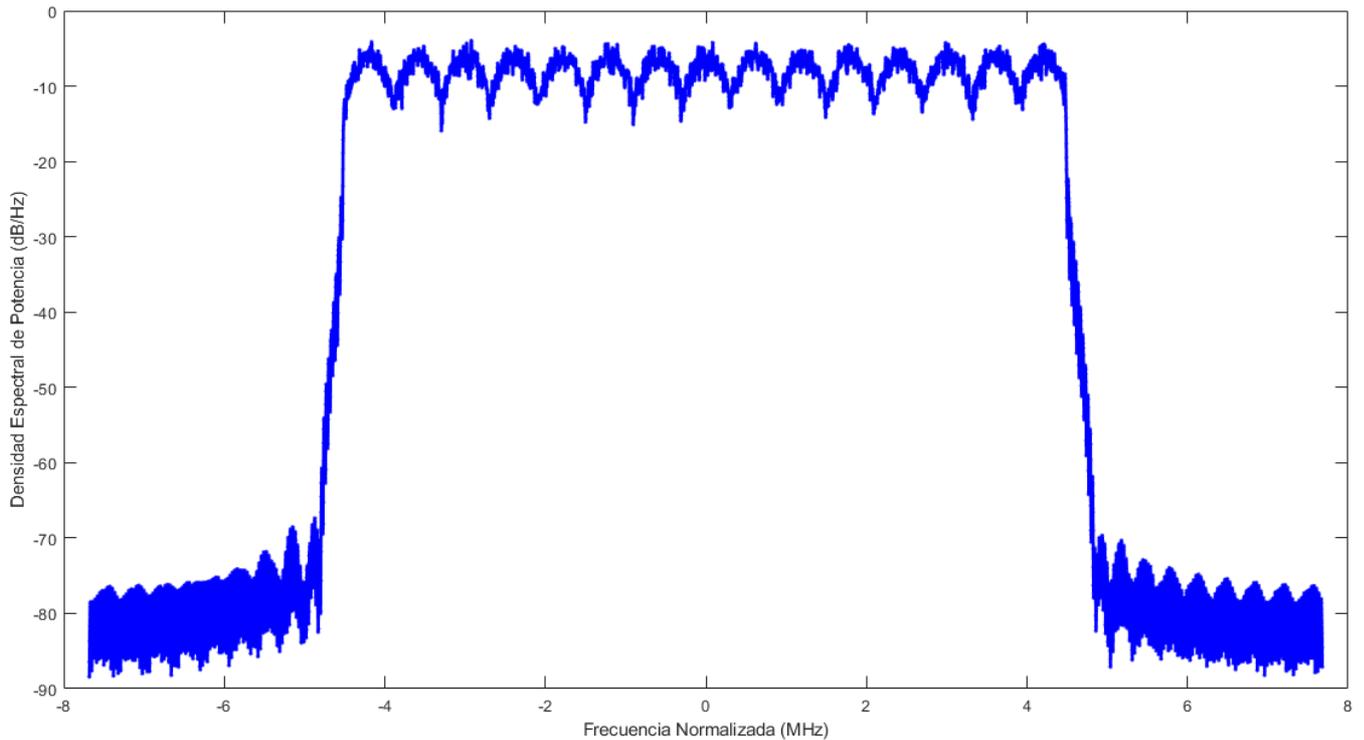


Figura 5-10 Espectro de una señal UFMC software con 15 subbandas

- En UFMC no es necesario el uso de prefijo cíclico, lo que aumenta considerablemente su eficiencia espectral en transmisiones limitadas en banda y/o tiempo.
- UFMC permite un uso flexible del espectro y acceso al medio de forma dinámica donde un número de subbandas (sin necesidad de ser contiguas) puede ser asignado a cada usuario en función de las necesidades de cada momento.
- UFMC puede usarse incluso con diferentes espaciados de subportadora o tiempos de filtro para usuarios en diferentes subbandas. Por ejemplo, el usuario 1 usa un tamaño de FFT particular N_1 y la longitud del filtro L_1 , el usuario 2 usa N_2 y L_2 y las duraciones de los símbolos UFMC podrían diseñarse de manera idéntica, por lo que $N_1 + L_1 - 1 = N_2 + L_2 - 1$.
- Las rampas de subida y bajada del filtro en el dominio del tiempo proporcionan una forma de símbolo que tiene una protección suave inherente contra la interferencia entre símbolos (ISI), así como una robustez para admitir usuarios de acceso múltiple que no están perfectamente alineados en el tiempo.

Esta protección se debe a que la potencia de la señal entre el comienzo de un símbolo y el final del anterior es prácticamente nula. Este efecto puede observarse en la Figura 5-11. Un mejor diseño de los filtros para seleccionar sus parámetros de una forma óptima para UFMC mejora aún más incluso esta protección ante ISI y multitrayecto como se puede observar en [13] y [14].

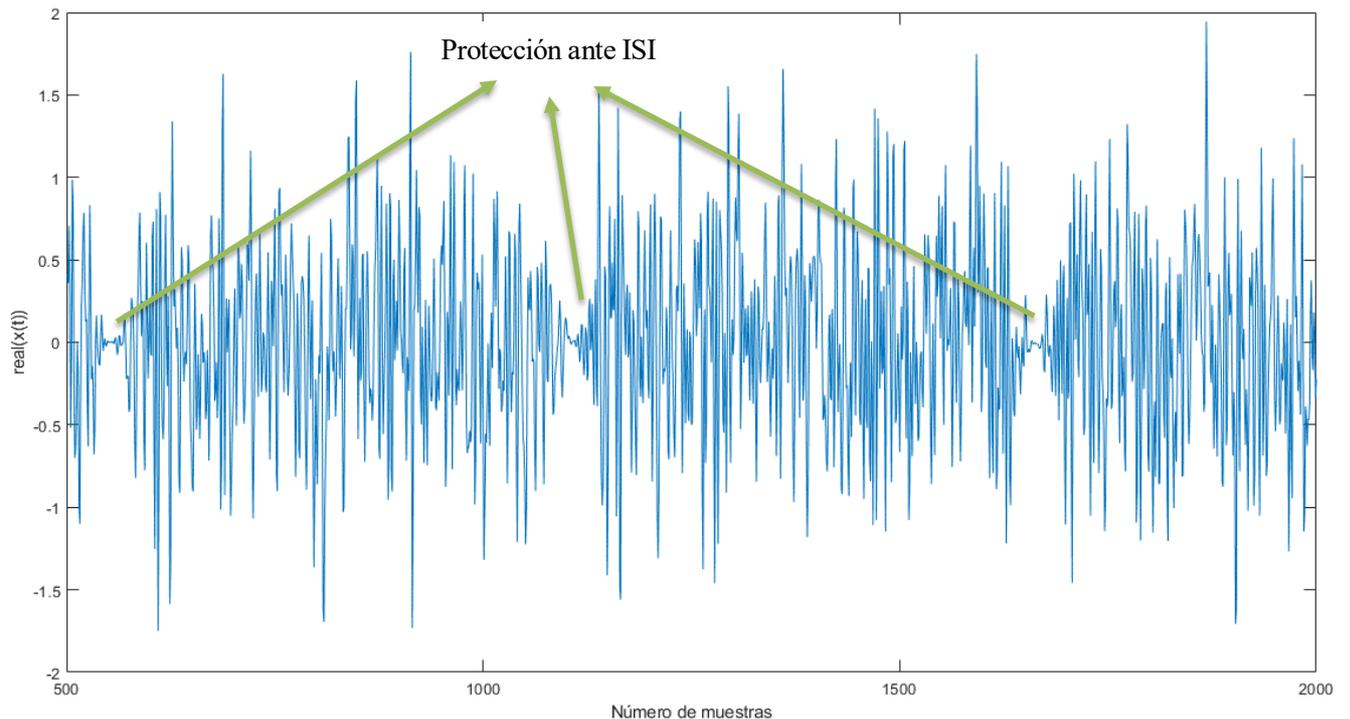


Figura 5-11 Parte real de $x(t)$ de una señal UFMC con 10 subbandas.

- UFMC es ortogonal respecto al plano complejo. Por lo que podemos utilizar símbolos complejos (QAM) sin preocuparnos por ninguno de los problemas descritos para FBMC. Como tener que utilizar O-QAM ni necesitamos agregar subportadoras de guarda adicionales entre las transmisiones de los diferentes usuarios.
- El diseño del receptor y el transmisor puede realizarse (como es el caso) en función de la FFT.
- Permite un mejor rendimiento ante situaciones de CFO (*Carrier Frequency Offset*) y desincronización temporal de la señal. En este ámbito, en [12] se propone utilizar un mecanismo de sincronización abierto para todos los dispositivos, así como IDMA (*Interleave-Division Multiple-Access*) para el acceso múltiple [15]. Estas técnicas son menos estrictas en la sincronización en tiempo y frecuencia y presentan un gran rendimiento en su uso conjunto con UFMC y FEC (*Forward Error Correction*) [12].
- La complejidad de procesamiento es alta tanto en la recepción como en la transmisión.
- La transmisión en ráfagas cortas y con baja latencia utilizando UFMC tiene un alto rendimiento.
- Como hemos repasado en otros puntos en esta misma sección, su compatibilidad con sistemas OFDM actuales es prácticamente completa.

5.3 Comparación de UFMC con OFDM

Está claro que OFDM debe ser adaptado para poder satisfacer los estándares de 5G. De entre las formas de onda candidatas derivadas de OFDM, UFMC es la más novedosa. Asimismo, es la onda candidata con más compatibilidad con los actuales sistemas que utilizan CP-OFDM. Utilizando longitudes de filtro del orden del prefijo cíclico en OFDM, así como un número de subportadoras por subbanda parecido o igual al número de subportadoras por PRB en OFDM obtenemos una compatibilidad casi del 100%, lo que permitiría su coexistencia. Incluso, podemos aplicar todos los conocimientos existentes hasta ahora en OFDM a esta nueva forma de onda.

Por lo general, debemos considerar a UFMC como una mejora de los sistemas clásicos de CP-OFDM por las siguientes razones:

- Sus niveles de PAPR son a nivel práctico muy similares, incluso menores en el caso de UFMC con una correcta optimización de sus parámetros.
- UFMC no utiliza CP ni bandas de guarda, lo que mejora en gran medida su eficiencia espectral frente a la de OFDM.
- La emisión fuera de banda (OOB) es aproximadamente nula en UFMC, eliminando uno de los problemas principales de OFDM por completo. Podemos ver una comparación de ambos espectros en la Figura 5-12 a continuación:

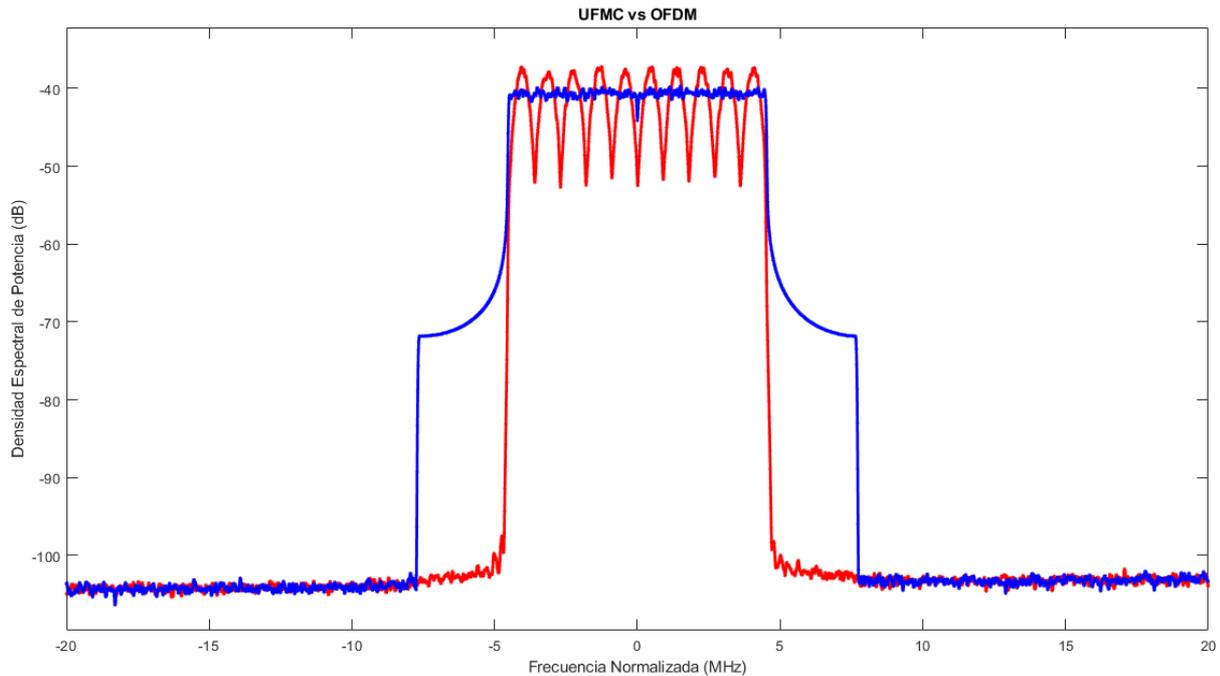


Figura 5-12 Espectros de una señal UFMC con 10 subbandas (rojo) y una señal OFDM 5G NR (azul) medidas en el laboratorio

- Pese a no utilizar prefijo cíclico, UFMC posee una protección inherente a la ISI y al multirrayecto gracias a la característica comentada en la sección anterior sobre su baja energía entre símbolos. Con la optimización de esta particularidad UFMC mejora los rendimientos de OFDM ante estos obstáculos. Esta diferencia entre señales en el dominio temporal se puede ver en la Figura 5-13.
- UFMC presenta mayor tolerancia frente a desincronización en el tiempo o desplazamientos en frecuencia de la señal, que no influyen de una forma tan negativa como en OFDM, donde el mínimo porcentaje de cualquiera de ambas cuestiones pondría en riesgo correcto funcionamiento de la comunicación.
- Para un escenario de CoMP en el UL en presencia de CFO, en [16] se ha demostrado que el rendimiento UF-OFDM es superior al CP-OFDM, debido a la mayor robustez ante la ICI, derivada del filtrado.
- En [10] se realiza una comparación entre CP-OFDM, FBMC / OQAM y UF-OFDM, que muestra la superioridad de UF-OFDM, especialmente en comunicación de ráfaga corta, que es importante en escenarios 5G, así como con paquetes pequeños, baja latencia, transmisiones con eficiencia energética y conmutación TDD de alta velocidad.

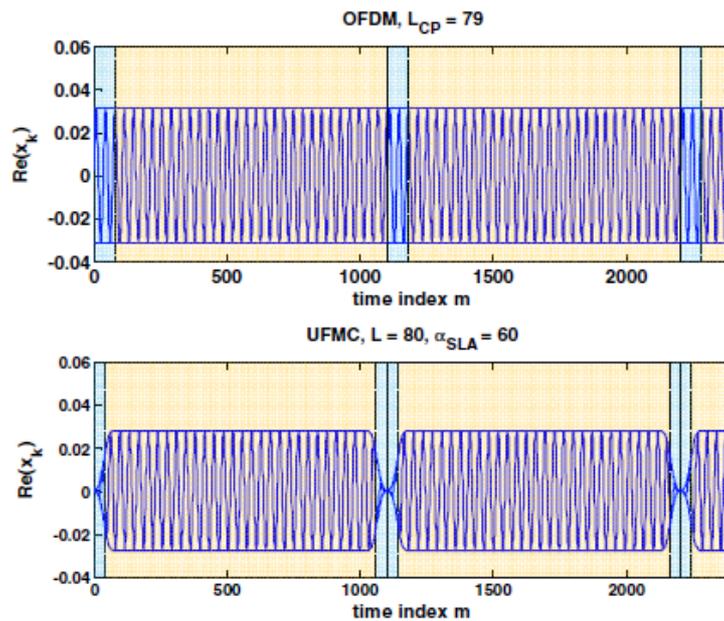


Figura 5-13 Trenes de símbolos de CP-OFDM (arriba) y UFMC (abajo), ejemplificados por una única subportadora (parte real). Zonas azul claro: CP y rampas de filtro, respectivamente. Zonas naranjas claro: parte portadora de datos

En resumen, una vez expuestas las diferencias entre ambas formas de onda y visto que de forma teórica y práctica sus niveles de compatibilidad son muy altos, UFMC aporta numerosas ventajas sobre OFDM, superando claramente en rendimiento en todos los aspectos claves que necesita la nueva forma de onda de 5G.

6 RESULTADOS EXPERIMENTALES

En este capítulo se mostrarán los resultados obtenidos en el laboratorio midiendo las señales UFMC y OFDM 5G-NR y los resultados recabados de forma software en MATLAB, también de ambas señales. Con el código del capítulo anterior y el que se dispone en el Anexo A se generaron en MATLAB sendas señales. Posteriormente pudimos cargar la envolvente compleja de estas señales sobremuestreadas al generador de señal para poder medirlas después en un analizador vectorial de señal. Los equipos utilizados y la metodología se detallan mejor en el capítulo 2.

En concreto, las medidas a realizar a cada señal serán: la PAPR de la señal de entrada, el ACPR (*Adjacent Channel Power Ratio*), el NMSE (*Normalised Mean Square Error*) entre la señal generada software y la generada por el equipo y el EVM. También se mostrarán imágenes del espectro de ambas señales y sus respectivas constelaciones. El valor del NMSE nos dará una idea del parecido entre la señal ideal creada en MATLAB y la señal real generada en el laboratorio por el generador de señal.

6.1 Escenario y parámetros de las medidas

Las señales generadas en MATLAB y posteriormente trasladadas al generador de señal tienen estos parámetros:

Tabla 6-1 Parámetros de las señales generadas

Forma de onda	OFDM 5G-NR			UFMC		
Número de subportadoras activas	300 900 300			900		
Tamaño de la FFT	512 1024 512			1024		
Longitud Prefijo cíclico (CP)	43			-		
Longitud del filtro (L)	-			43		
PRBs / N° subportadoras por PRB	25 / 12	75 / 12	25 / 12	75 / 12		
N° Slots	16			16		
Δf (kHz)	15	30	30	15	30	30
OVS (<i>Oversampling</i>)	3	6	12	3	6	12
Subbandas	-			1,5,10,15,30,300	1,5,10,15,30,300,900	
Subportadoras por subbanda	-			300,60,30,20,10,1	900,180,90,60,30,3,1	
Ancho de banda efectivo ocupado [MHz]	4.5	9.0	27.0	4.5	9.0	27.0
Ancho de banda reservado para el canal [MHz]	5.0	10.0	30.0	5.0	10.0	30.0

Ambas señales serán testeadas en un escenario lineal idéntico al que se muestra en la Figura 6-1. Este escenario se basa únicamente en la conexión directa mediante un cable SMA y un atenuador de 10 dB entre el generador de señal y el analizador de espectro. Por lo tanto, el único efecto que sufren las señales es una atenuación (en torno a 13 dB) producida por el paso de la señal a través de ambos elementos. Sin embargo, el postprocesado que se hace tras la adquisición de las señales permite corregir dicha atenuación mediante el correspondiente escalado de la señal. Dicho postprocesado cumple un segundo cometido consistente en alinear en el tiempo la señal adquirida con la señal generada software para poder compararlas.

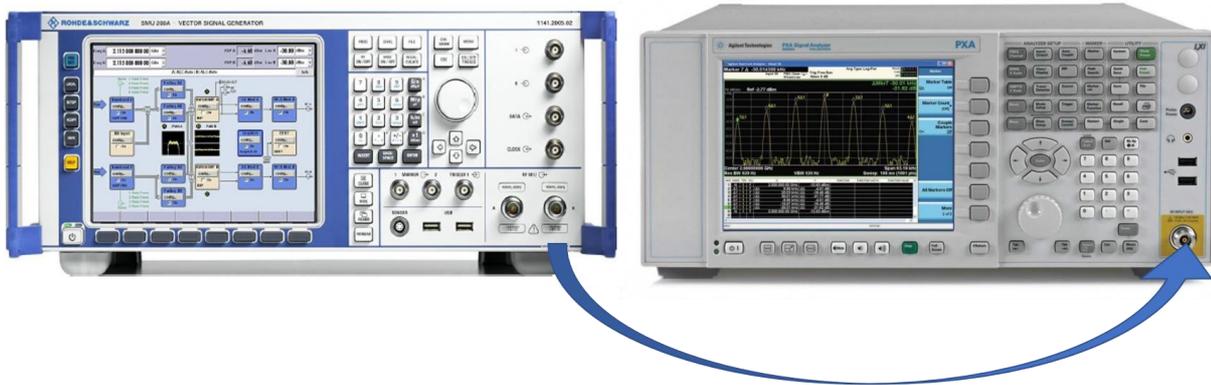


Figura 6-1 Escenario lineal donde se realizaron las medidas

6.2 Señales generadas

Antes de revisar los datos obtenidos con señales reales en el laboratorio, se van a presentar las señales generadas en MATLAB a las que llamaremos ideales o software. Se expondrán sus espectros, su PAPR y la constelación tras su demodulación. De esta forma, después podremos ver las diferencias entre estas señales ideales y las señales reales generadas.

Como puede observarse en la Tabla 6-1, hemos generado cada una de las dos señales UFMC y OFDM con tres formatos diferentes. Cada uno de estos formatos posee valores diferentes para el número de PRBs, la separación entre subportadoras, el tamaño de la FFT y el factor de sobremuestreo (OVS). En la Tabla 6-2 se describen los valores de estos parámetros para cada formato. De aquí en adelante, se hará referencia a las señales por su formato con el fin de simplificar la notación. Así una señal UFMC con formato 2 y 15 subbandas se escribirá como UFMC 2-15, o una OFDM con formato 3, OFDM 3.

Tabla 6-2 Formatos de las señales generadas

Formato	PRBs	Δf (kHz)	OVS	Tamaño de la FFT
1	25	30	6	512
2	25	15	12	512
3	75	30	3	1024

En las siguientes subsecciones se muestran los espectros, constelaciones y PAPR de las señales software generadas tanto de UFMC como de OFDM con los formatos anteriormente descritos. En este capítulo se reflejarán algunas de las imágenes más representativas de los espectros y las constelaciones, el resto de las imágenes para completar toda la información de cada una de las señales se dejan expuestas en el Anexo B.

6.2.1 Señales con formato 1

Señales generadas con MATLAB de UFMC y OFDM con formato 1:

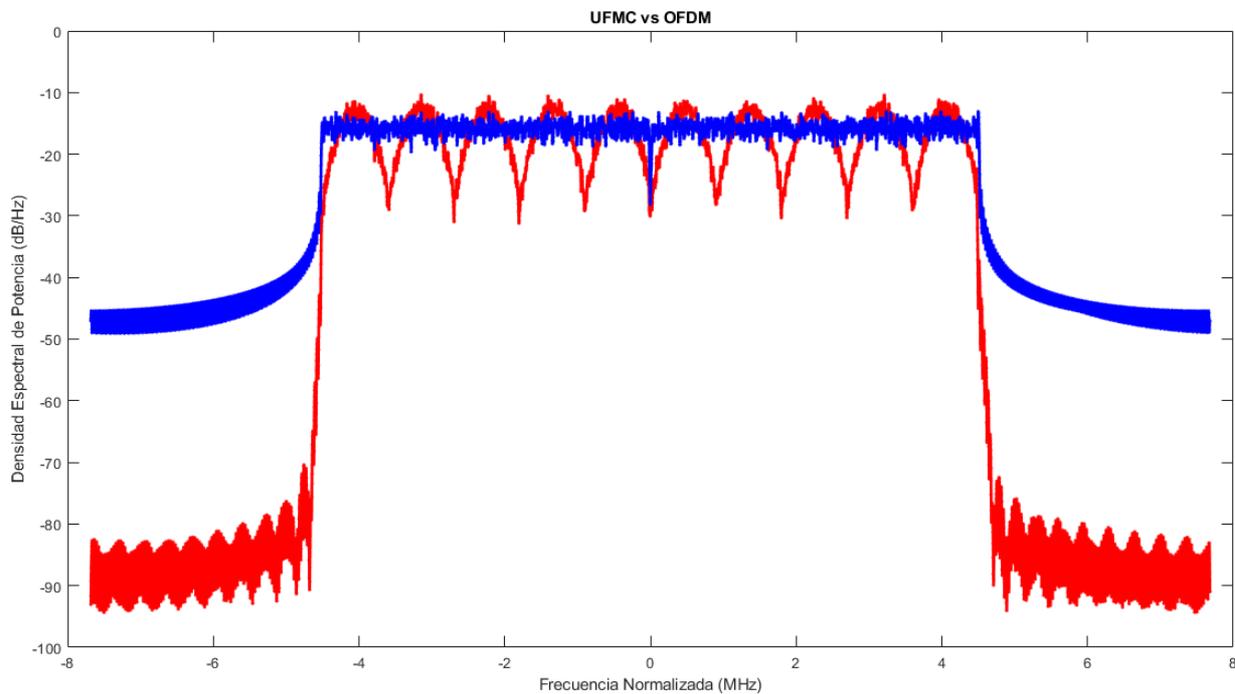


Figura 6-2 Espectros de UFMC 1-10 y OFDM 1 software sin sobremuestreo

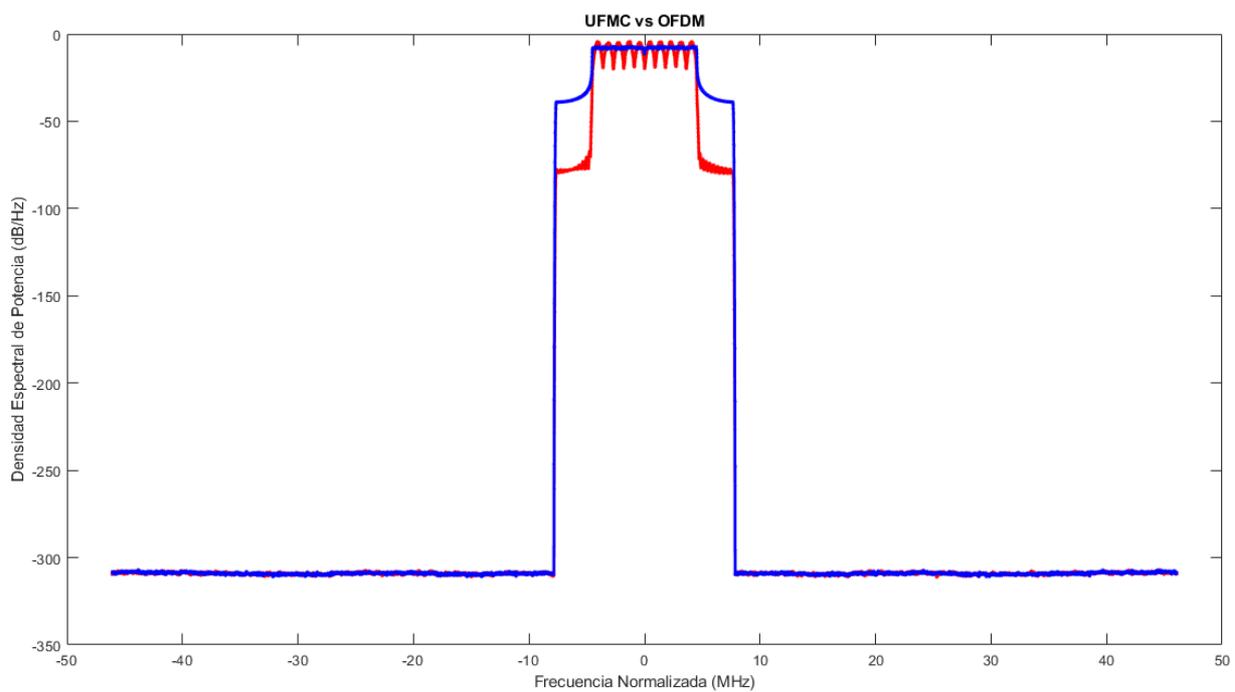


Figura 6-3 Espectros de UFMC 1-10 y OFDM 1 software con sobremuestreo

Lo primero que podemos observar en estos espectros es que, ocupando el mismo ancho de banda, la señal UFMC en rojo tiene una menor radiación en los canales adyacentes (OOB).

Tabla 6-3 PAPR señales formato 1

Forma de onda	UFMC 1-1	UFMC 1-5	UFMC 1-10	UFMC 1-15	UFMC 1-30	UFMC 1-300	OFDM 1
PAPR (dB)	9.60	10.92	10.69	10.58	10.85	10.33	10.49
PAPR ovs (dB)	9.61	11.36	11.04	10.59	10.85	10.89	10.76

6.2.2 Señales con formato 2

Señales generadas con MATLAB de UFMC y OFDM con formato 2:

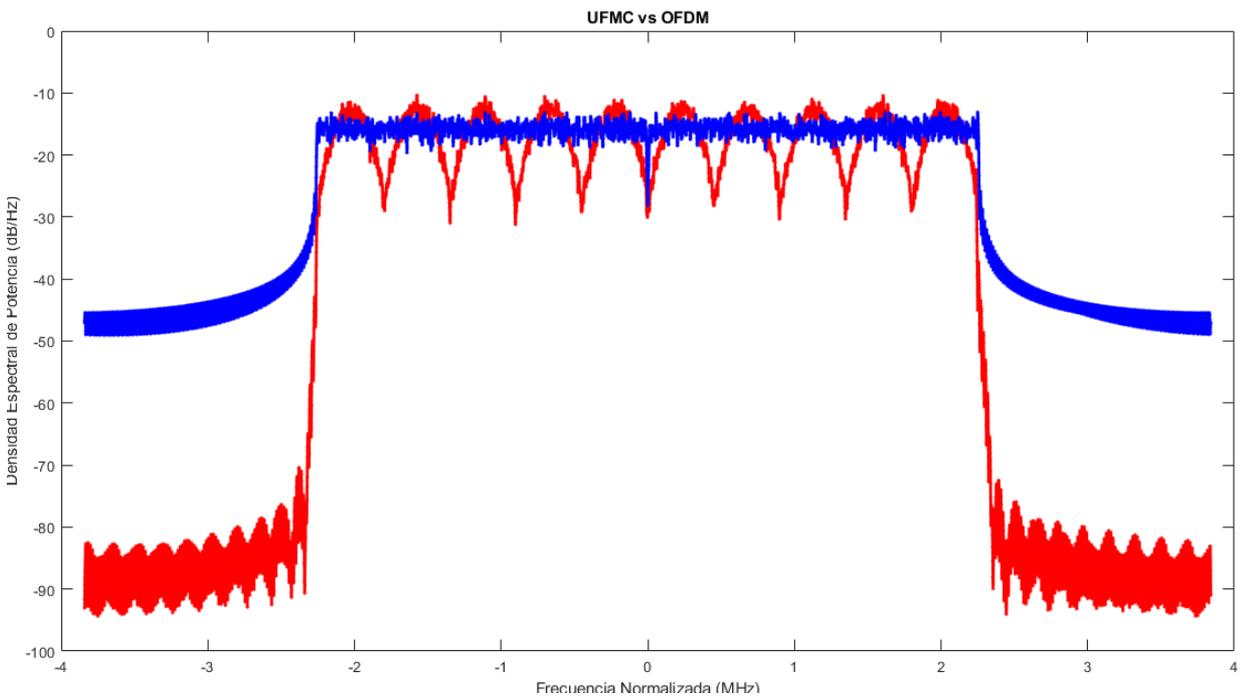


Figura 6-4 Espectros de UFMC 2-10 y OFDM 2 software sin sobremuestreo

En este caso el espectro es prácticamente igual que con el formato 1 así como sus características, ambos formatos tienen comportamientos muy parecidos. La única diferencia es que, al tener una separación entre subportadoras menor, el ancho de banda disminuye a la mitad.

Tabla 6-4 PAPR señales formato 2

Forma de onda	UFMC 2-1	UFMC 2-5	UFMC 2-10	UFMC 2-15	UFMC 2-30	UFMC 2-300	OFDM 2
PAPR (dB)	9.60	10.92	10.69	10.58	10.85	10.33	10.49
PAPR ovs (dB)	9.61	11.37	11.04	10.63	10.85	10.89	10.76

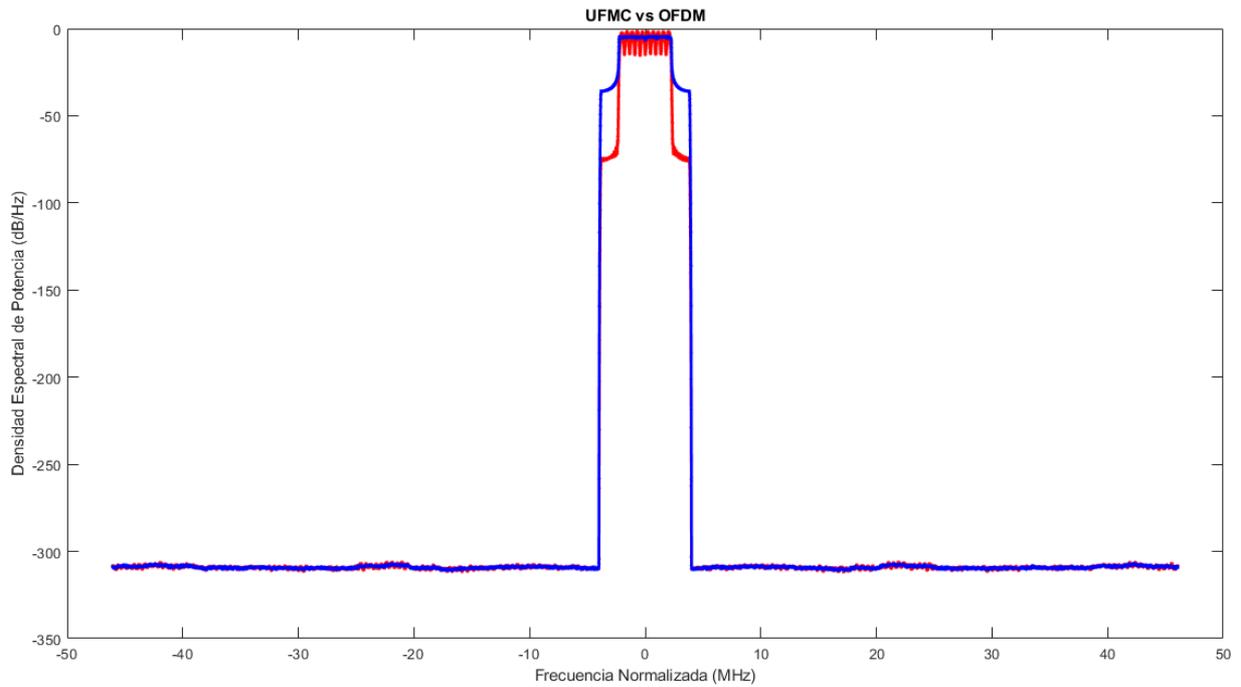


Figura 6-5 Espectros de UFMC 2-10 y OFDM 2 software con sobremuestreo

6.2.3 Señales con formato 3

Señales generadas con MATLAB de UFMC y OFDM con formato 3:

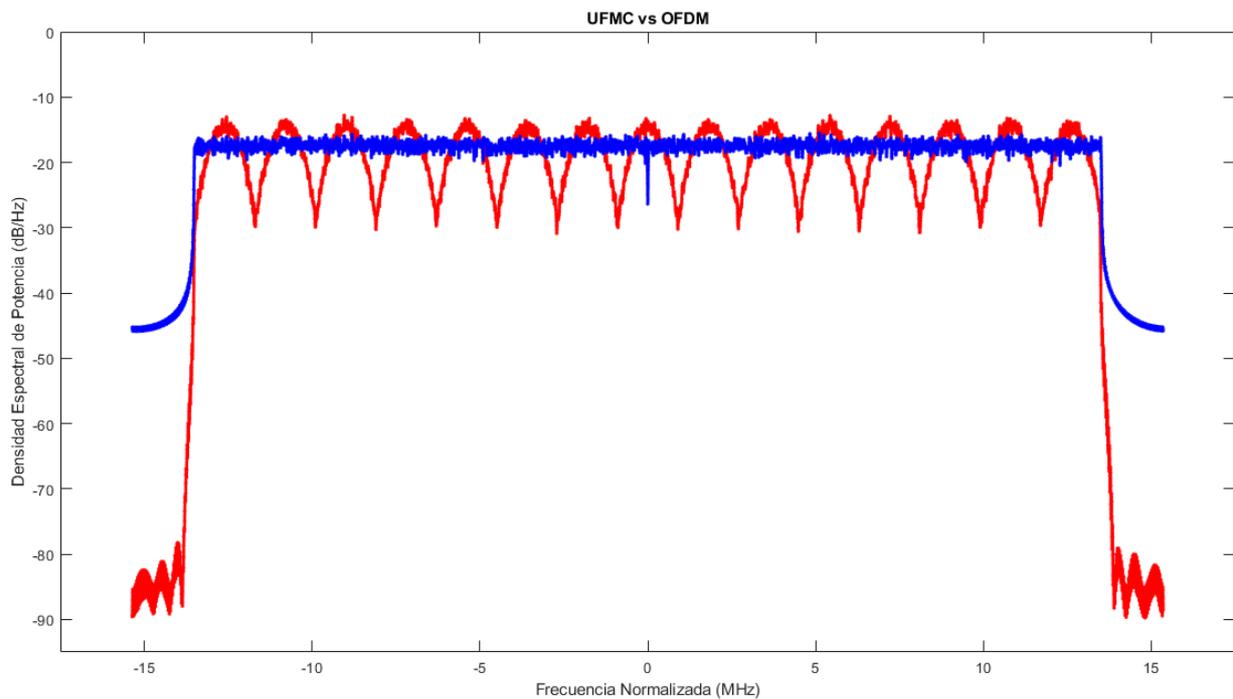


Figura 6-6 Espectros de UFMC 3-15 y OFDM 3 software sin sobremuestreo

Tabla 6-5 PAPR señales formato 3

Forma de onda	UFMC 3-1	UFMC 3-5	UFMC 3-10	UFMC 3-15	UFMC 3-30	UFMC 3-300	UFMC 3-900	OFDM 3
PAPR (dB)	9.60	10.68	11.19	10.59	11.42	10.20	10.22	11.71
PAPR ovs (dB)	9.61	11.11	11.69	10.91	11.47	11.28	11.07	11.71

En este último formato tenemos 900 portadoras en lugar de 300, por eso se muestra un ejemplo de la señal con 15 subbandas en lugar de con 10. De esta forma obtenemos un espectro más identificativo de la señal UFMC. Además, como veremos a continuación en la sección de resultados del laboratorio, cuantas más portadoras tenga la señal, más grande será el número de portadoras por subbanda necesario para obtener un mayor rendimiento de la señal UFMC.

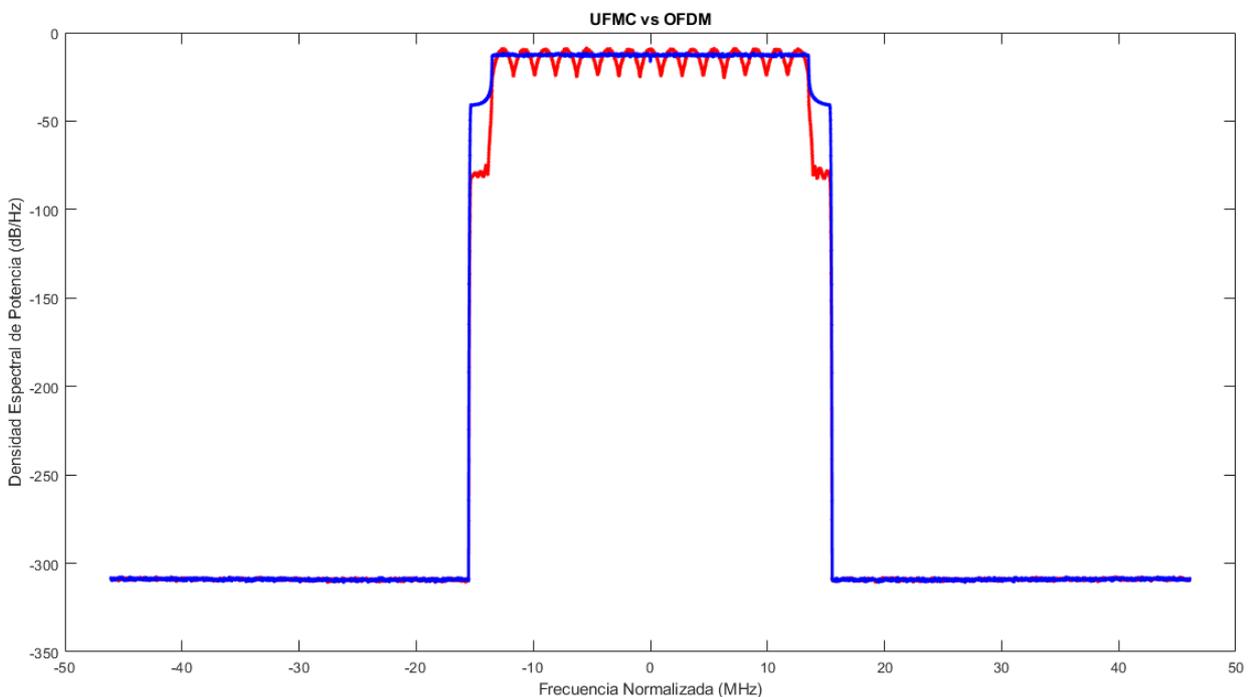


Figura 6-7 Espectros de UFMC 3-15 y OFDM 3 software con sobremuestreo

6.3 Resultados obtenidos en el laboratorio

Tras la creación de las señales ideales anteriores en MATLAB, se introducen las formas de onda en un generador de señal que produce una señal modulada real que, mediante un cable, llega hasta un analizador vectorial de señal donde podemos medirla y adquirir muestras de su envolvente compleja para procesar la medida en MATLAB de nuevo.

Para este proceso debemos generar un sobremuestreo en las señales para poder cargarlas en los equipos y ver los canales adyacentes. Todas las imágenes y datos mostrados en esta sección se corresponden a las señales ideales o las señales medidas con el sobremuestreo que se indica en la Tabla 6-2 para cada formato.

En las siguientes subsecciones se muestran los datos recogidos en el laboratorio respecto a la señal ideal sobremuestreada que se pasa como referencia al generador de señal.

6.3.1 Señales con formato 1

Señales medidas en el laboratorio de UFMC y OFDM con formato 1:

Tabla 6-6 Datos obtenidos de las señales reales con formato 1

Forma de onda	UFMC 1-1	UFMC 1-5	UFMC 1-10	UFMC 1-15	UFMC 1-30	UFMC 1-300	OFDM 1	
NMSE (dB)	-51.71	-48.21	-48.8	-48.51	-48.54	-48.52	-48.54	
ACPR (dBc)	Canal anterior	-62.96	-63.26	-63.27	-63.23	-63.31	-63.29	-63.47
	Canal posterior	-62.40	-62.65	-62.51	-62.57	-62.68	-62.57	-62.50
ACPR canales secundarios (dBc)	Canal anterior	-63.82	-63.75	-63.77	-63.75	-63.76	-63.73	-63.73
	Canal posterior	-62.65	-62.57	-62.50	-62.56	-62.52	-62.52	-62.05
EVM (%)	39.94	47.97	0.63	0.63	0.62	0.68	0.3061	

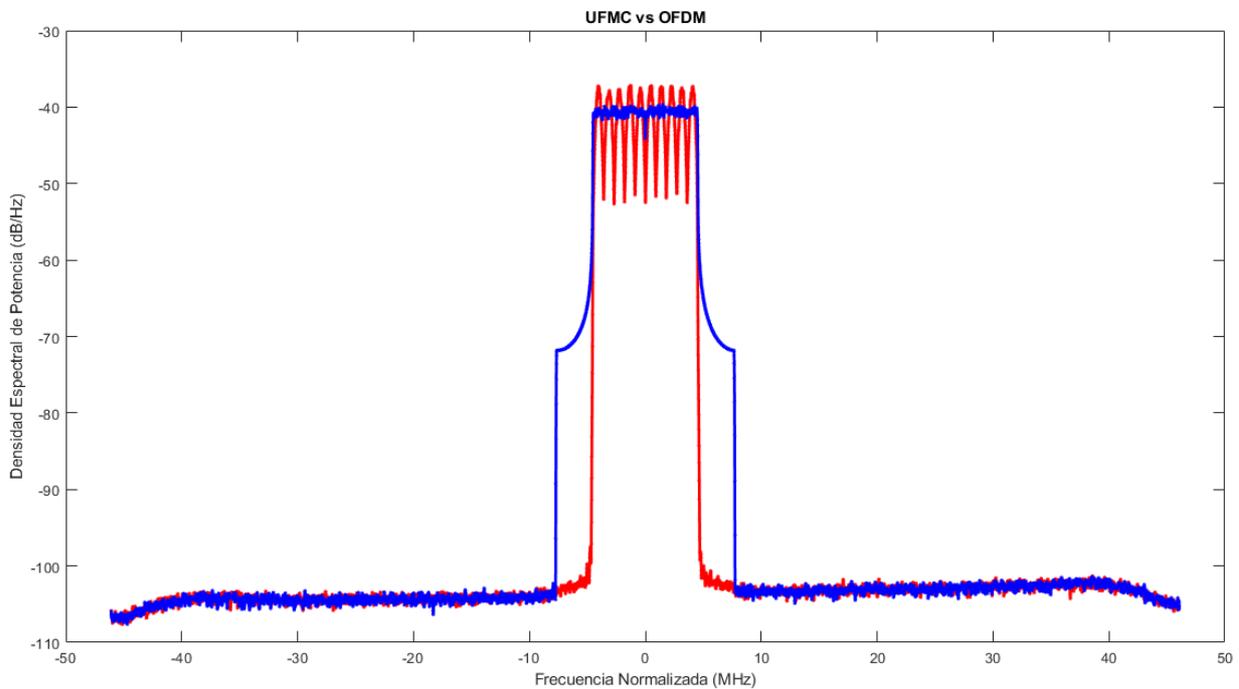


Figura 6-8 Espectros de UFMC 1-10 y OFDM 1 medidas en el laboratorio con sobremuestreo

De nuevo, podemos observar con el espectro de señales reales cómo ocupando el mismo ancho de banda UFMC ofrece una clara mejora en las ramas de bajada y subida de la señal, no introduciéndose apenas fuera de su canal.

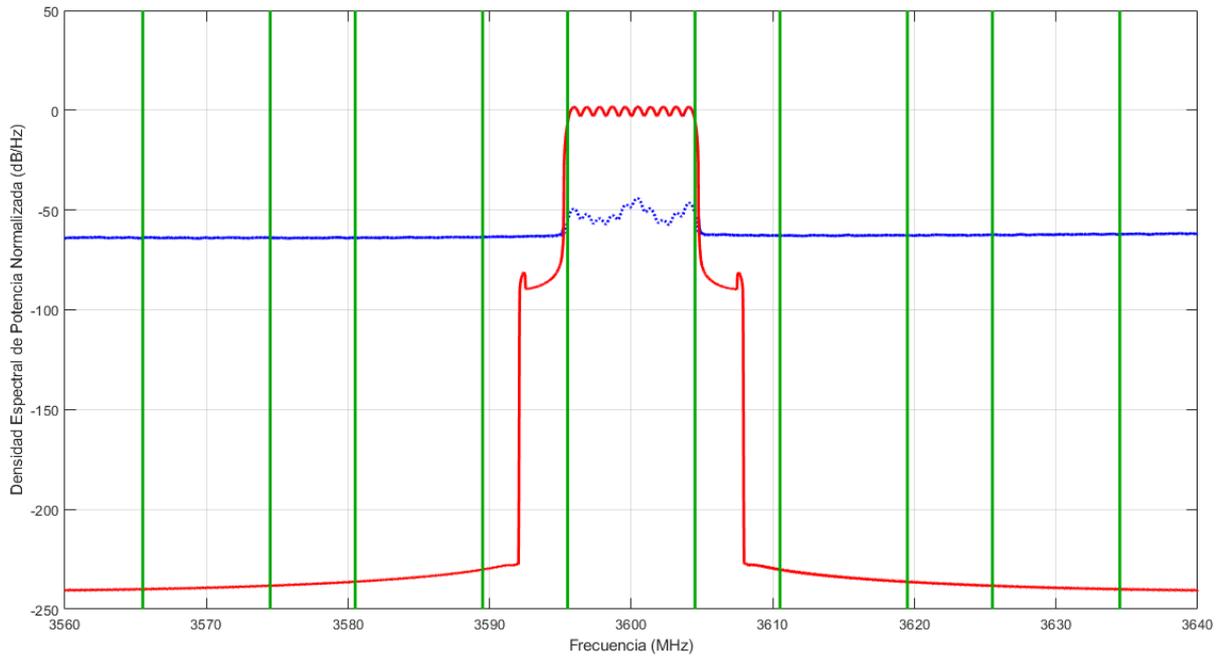


Figura 6-9 Espectro de la señal UFMC 1-10 software (rojo), medida en el laboratorio (azul) y el error entre ambas (azul discontinuo)

En la Figura 6-9 se representan los espectros de la señal software y la señal real comparados, así como el espectro de su señal error. En verde se muestran el canal de transmisión de la señal y los canales adyacentes. Aquí se comprueba con más claridad si cabe cómo la señal no tiene en la práctica nada de potencia fuera de su canal.

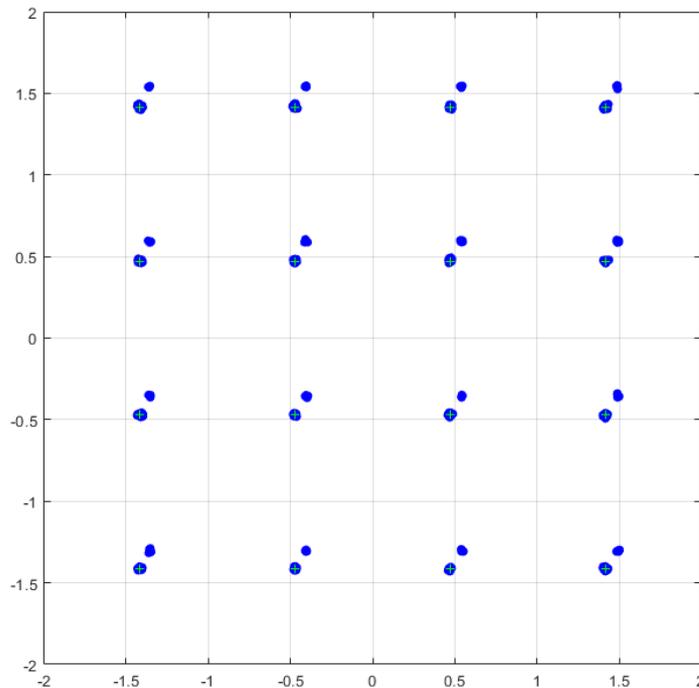


Figura 6-10 Constelación símbolos QAM de la señal demodulada UFMC 1-10 medida en el laboratorio

En la constelación se observan los símbolos complejos de la 16 QAM de forma clara. Aun así, existe una especie de desdoblamiento de cada símbolo en diagonal empeorando algo el EVM de la señal. Se cree que esto se debe a un problema de *carrier leakage* debido a que la portadora central sí lleva información y no se deja sin potencia como en OFDM para resolver este problema.

6.3.2 Señales con formato 2

Señales medidas en el laboratorio de UFMC y OFDM con formato 2:

Tabla 6-7 Datos obtenidos de las señales reales con formato 2

Forma de onda	UFMC 2-1	UFMC 2-5	UFMC 2-10	UFMC 2-15	UFMC 2-30	UFMC 2-300	OFDM 2	
NMSE (dB)	-49.62	-48.18	-48.27	-48.25	-48.21	-48.24	-48.22	
ACPR (dBc)	Canal anterior	-63.68	-63.53	-63.61	-63.50	-63.51	-63.52	-63.34
	Canal posterior	-63.09	-63.03	-63.00	-62.90	-62.85	-62.93	-62.79
ACPR canales secundarios (dBc)	Canal anterior	-64.04	-63.84	-63.85	-63.80	-63.80	-63.77	-63.68
	Canal posterior	-62.95	-62.72	-62.77	-62.69	-62.67	-62.70	-62.54
EVM (%)	40.90	54.86	0.59	0.60	0.59	0.65	0.24	

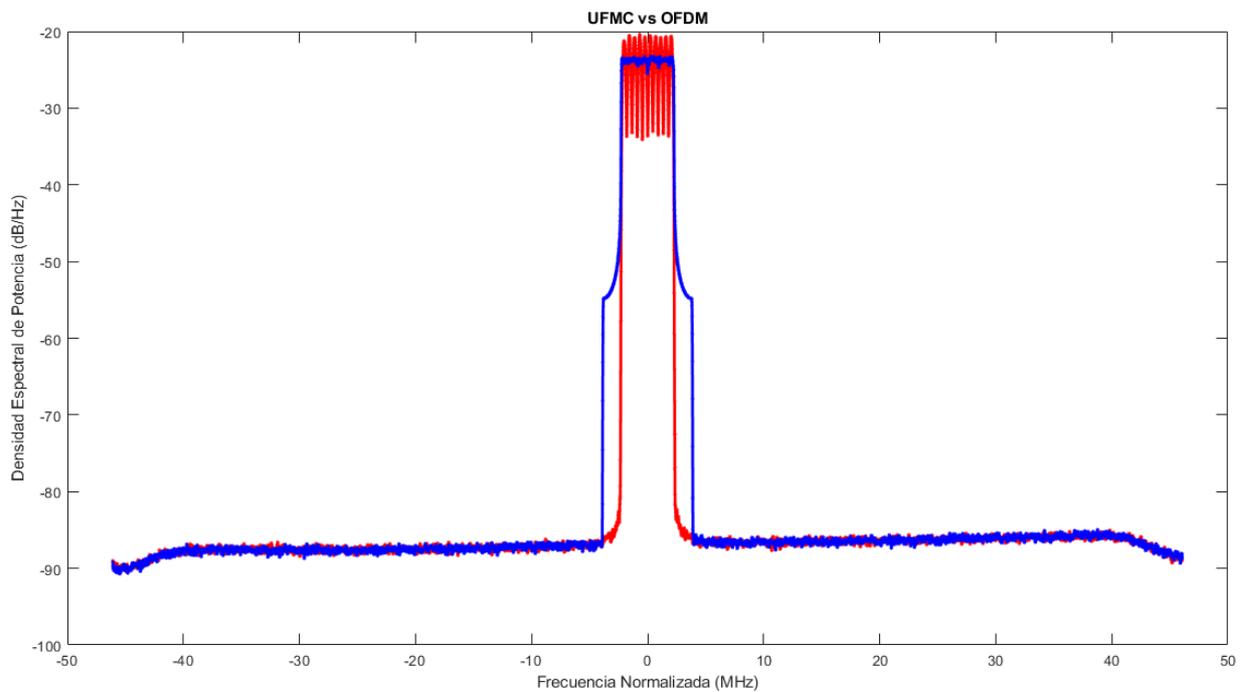


Figura 6-11 Espectros de UFMC 2-10 y OFDM 2 medidas en el laboratorio con sobremuestreo

En este caso se repite de nuevo el comportamiento como en el caso de las señales software. El rendimiento es idéntico al formato 1 pero con la mitad de ancho de banda.

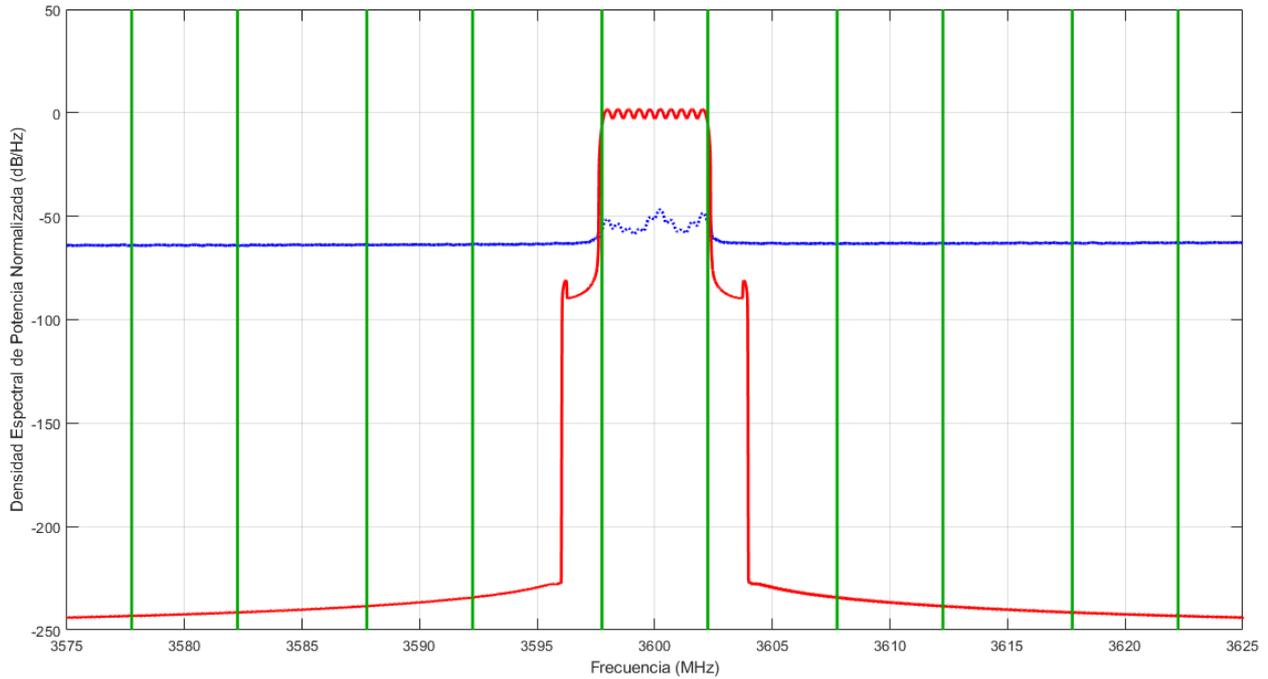


Figura 6-12 Espectro de la señal UFMC 2-10 software (rojo), medida en el laboratorio (azul) y el error entre ambas (azul discontinuo)

En la Figura 6-12 los canales en verde también sirven como referencia para saber la zona del espectro en la que se ha integrado para calcular los ACPR respecto el canal central en todos los casos.

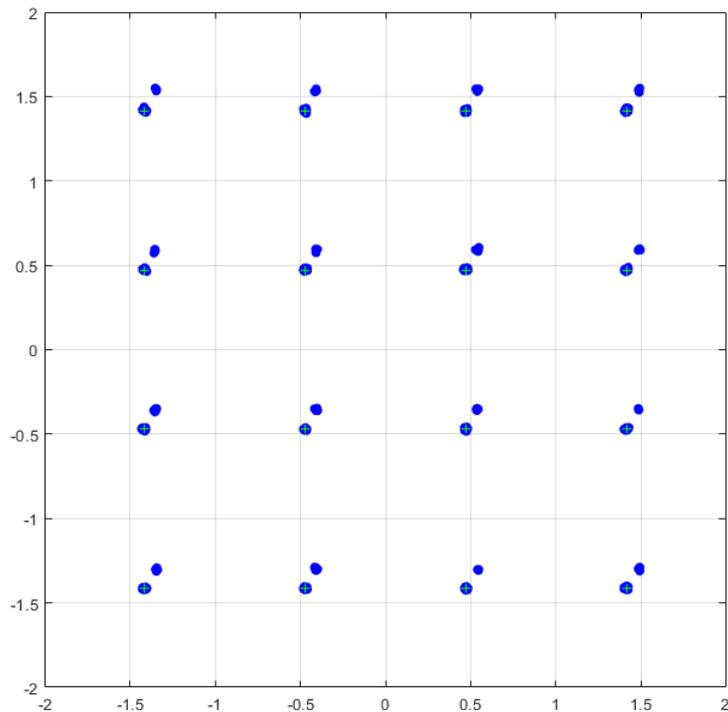


Figura 6-13 Constelación símbolos QAM de la señal demodulada UFMC 2-10 medida en el laboratorio

6.3.3 Señales con formato 3

Señales medidas en el laboratorio de UFMC y OFDM con formato 3:

Tabla 6-8 Datos obtenidos de las señales reales con formato 3

Forma de onda	UFMC 3-1	UFMC 3-5	UFMC 3-10	UFMC 3-15	UFMC 3-30	UFMC 3-300	UFMC 3-900	OFDM 3	
NMSE (dB)	-50.39	-43.73	-44.70	-44.41	-44.45	-44.45	-44.08	-44.50	
ACPR (dBc)	Canal anterior	-59.37	-59.34	-59.35	-59.40	-59.30	-59.34	-59.59	-59.23
	Canal posterior	-57.67	-57.52	-57.57	-57.57	-57.53	-57.56	-57.74	-57.43
ACPR canales secundarios (dBc)	Canal anterior	-	-	-	-	-	-	-	-
	Canal posterior	-	-	-	-	-	-	-	-
EVM (%)	44.25	25.60	9.30	0.83	0.80	1.30	1.30	0.57	

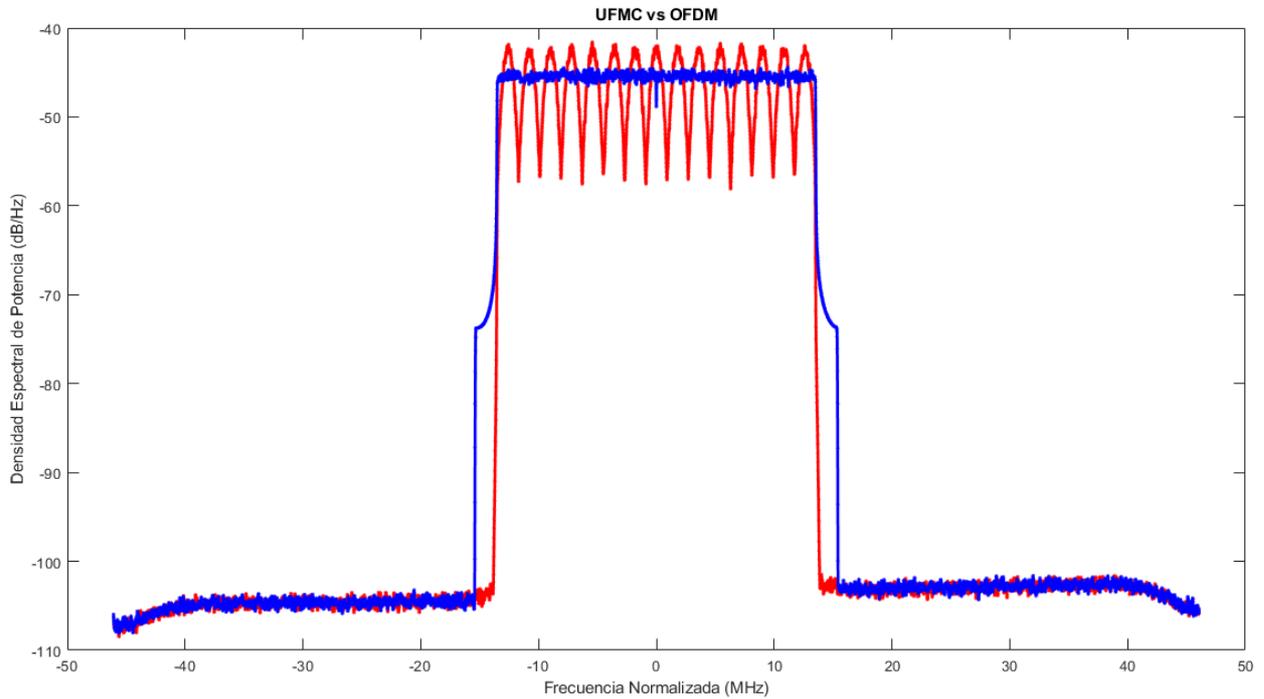


Figura 6-14 Espectros de UFMC 3-15 y OFDM 3 medidas en el laboratorio con sobremuestreo

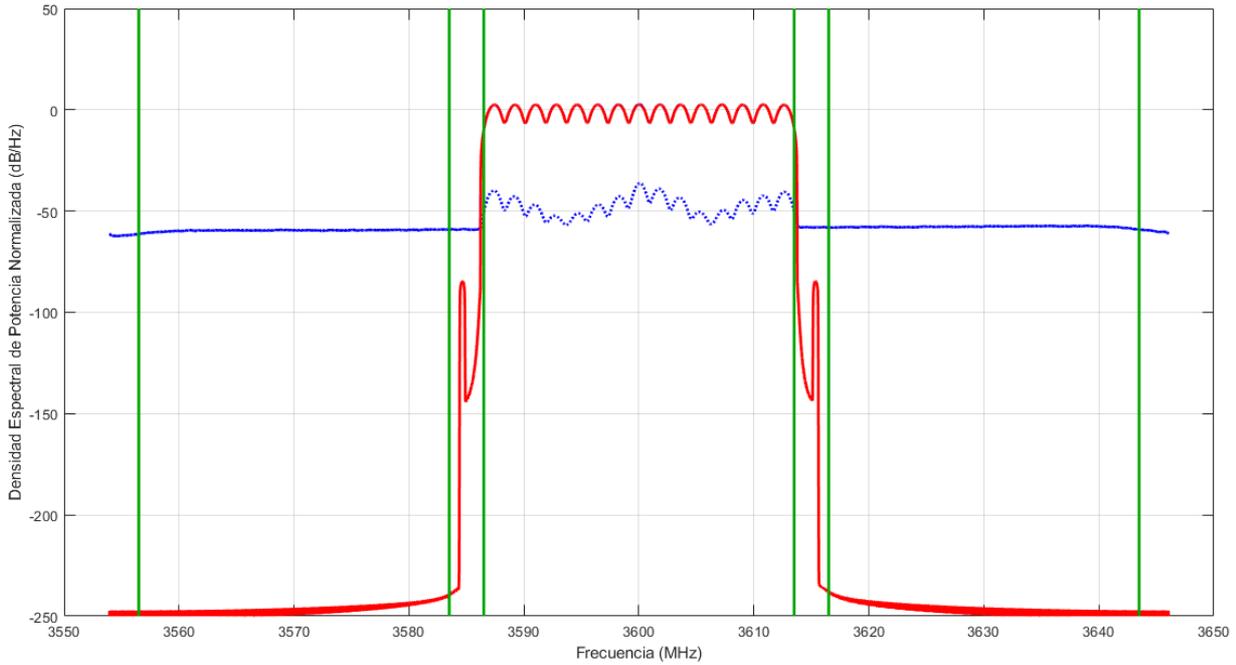


Figura 6-15 Espectro de la señal UFMC 3-15 software (rojo), medida en el laboratorio (azul) y el error entre ambas (azul discontinuo)

En el caso de 900 subportadoras, solo pudimos añadir un canal adyacente ya que 3 era el mayor factor de sobremuestreo que se podía añadir para poder ver la señal en los equipos y obtener la misma frecuencia de muestreo para todos los formatos.

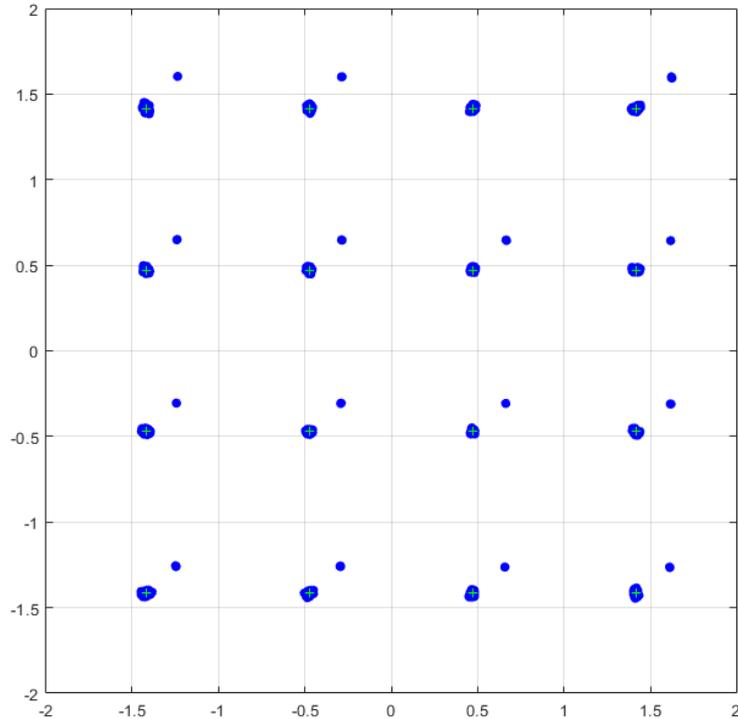


Figura 6-16 Constelación símbolos QAM de la señal demodulada UFMC 3-15 medida en el laboratorio

Conclusiones de los resultados

6.4 Conclusión de los resultados

Una vez expuestos los datos obtenidos con las señales UFMC y OFDM, tanto en su versión ideal software como con las señales reales medidas en el laboratorio, podemos concluir lo siguiente:

1. Las señales UFMC y OFDM de entrada poseen valores de PAPR muy similares. Incluso puede reducirse la PAPR de las señales UFMC con la combinación correcta de portadoras por subbanda. Esto puede observarse también en la Figura 6-17 donde la potencia de ambas señales es prácticamente idéntica.
2. El nivel de potencia OOB en las señales UFMC se reduce entre 30 y 40 dB respecto a OFDM.
3. Ocupando el mismo ancho de banda, con la optimización de los parámetros de UFMC, esta nueva forma de onda ofrece un rendimiento muy similar a OFDM mejorando su radiación fuera de banda y una protección ante ISI natural sin CP ni bandas de guarda.
4. Al demodular las señales reales UFMC no se obtienen buenos valores de EVM hasta conseguir un mínimo de subportadoras por subbanda. Además, cuando la demodulación se realiza correctamente reduciendo el EVM a valores mucho mejores, obtenemos una desviación en cada uno de los símbolos QAM. Este efecto puede deberse a que la implementación de los filtros no es la óptima y/o a *carrier leakage*. En el Anexo B se pueden encontrar las imágenes de las constelaciones correspondientes a los valores malos de EVM a los que se hace referencia.

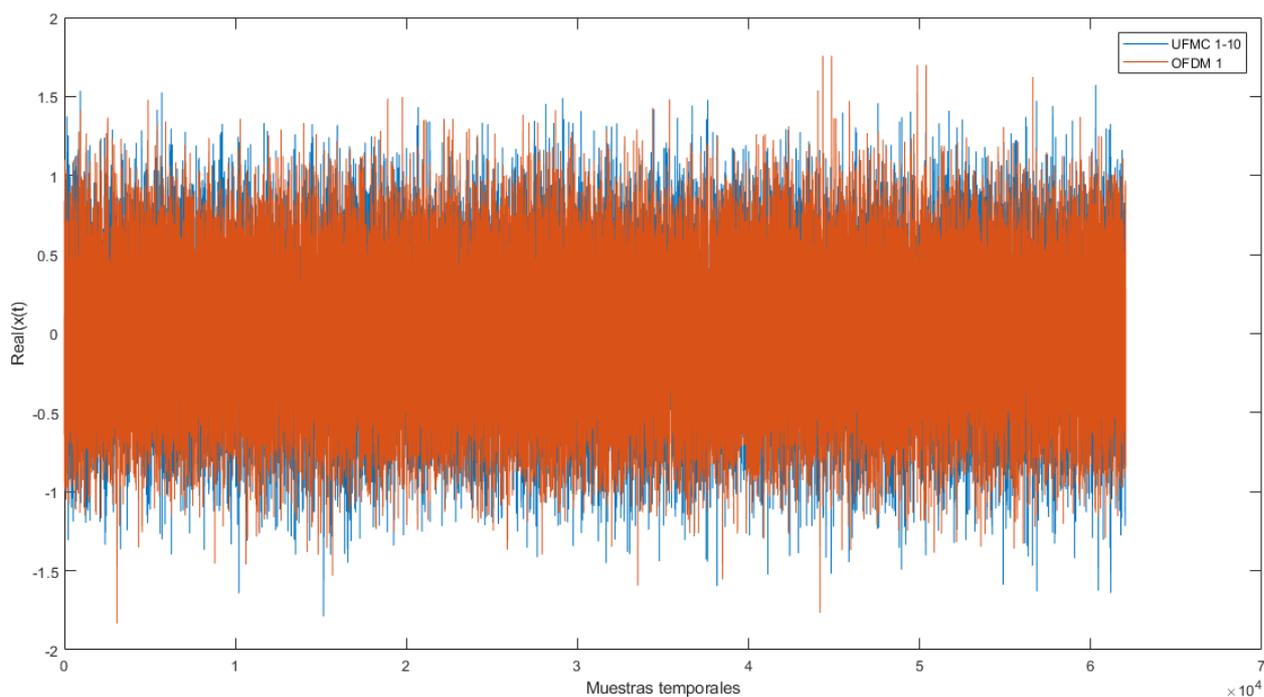


Figura 6-17 Parte real de las señales UFMC 1-10 y una OFDM 1 en el dominio del tiempo

7 CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Teniendo en cuenta lo expuesto sobre las bases teóricas de las señales descritas así como los resultados obtenidos con estas señales en el laboratorio y en MATLAB, y teniendo en cuenta las necesidades y requerimientos de las nuevas redes 5G de comunicaciones móviles, podemos concluir lo siguiente.

La forma de onda multiporrtadora dominante es y ha sido CP-OFDM [12]. Sin embargo, con la llegada inminente de una nueva generación de comunicaciones móviles (5G), llegan también nuevos retos y necesidades que OFDM no puede llegar a alcanzar.

Sus principales obstáculos son la necesidad de un enventanado de la misma para cumplir las máscaras espectrales, así como el uso del prefijo cíclico y bandas de guarda que disminuyen su eficiencia espectral. Aunque esto nos permite lidiar de forma eficaz con el multitrayecto, obtenemos un efecto de *overhead* del CP de entre 5-25%. Además, es necesario trabajar con una estricta sincronización en los dominios del tiempo y la frecuencia, lo que significa que cualquier desplazamiento en frecuencia CFO (Carrier Frequency Offset) o la mínima desincronización de las tramas causaría grandes problemas de ISI o ICI como vimos en el capítulo 4.

Ya hemos revisado nuevas opciones como GFDM o FMBC cuyo potencial como posible candidata para la forma de onda de 5G ha ganado mucha atracción en los últimos años [12] [10]. FMBC consigue reducir los niveles de potencia fuera de banda mediante una función de filtrado en el modulador. FMBC no utiliza CP consiguiendo una mejor eficiencia tiempo-frecuencia. Su principal problema es que funciona muy bien para ráfagas largas pero su rendimiento decae considerablemente para transmisiones de baja latencia con ráfagas cortas. Esto se debe a que los filtros son muy estrechos lo que provoca que la longitud de estos sea muy grande y por tanto su respuesta impulsiva también. Asimismo, en FMBC se pierde la ortogonalidad respecto al plano complejo y es necesario utilizar O-QAM lo que impide el uso de MIMO u otras técnicas de procesado de señal empleadas ya en LTE. GFDM es similar a FMBC, pero con convoluciones circulares para hacerlo más atractivo ante ráfagas cortas. No obstante, sus receptores son muy complejos y tiene el inconveniente de que genera superposición entre subportadoras.

En UPMC, el filtrado por bloques brinda una flexibilidad adicional y puede usarse para evitar los principales inconvenientes de FMBC. Al ser filtros más anchos en banda en paso-banda que los utilizados en FMBC, su respuesta impulsiva es más corta en tiempo. De esta manera UPMC puede soportar mejor las transmisiones en ráfagas pequeñas. [12]

En los resultados obtenidos en este trabajo se refuerza la idea de que UPMC brinda un rendimiento igual o mejor que OFDM dejando atrás tanto el prefijo cíclico como las bandas de guarda gracias a su espectro más estrecho. Si se añade incluso que UPMC puede llegar a implementarse de forma que sea muy compatible con los sistemas OFDM actuales obtenemos una nueva forma de onda excelente para las nuevas redes 5G.

Este trabajo, sin embargo, deja algunas incógnitas por el camino que han de ser analizadas y resueltas para conseguir una mejor implementación de UPMC. Para realizar un análisis más profundo y completo debería hallarse causa y solución al problema de la desviación de los símbolos en la demodulación de la señal, de la misma manera que se deben optimizar los parámetros de la señal para conseguir un mayor y mejor rendimiento. Una optimización de la implementación del filtro y la correcta elección de un número de subportadoras por subbanda óptimo en función del ancho de banda de la señal mejorarían el funcionamiento de este sistema UPMC.

ANEXO A

En este anexo se dejan expuestos los códigos completos de “UFMC_TX”, “UFMC_RX”, analiza_UFMC”, “OFDM_5GNR” y “OFDM_5GNR_RX”. Con estos códigos se han generado las señales UFMC y OFDM respectivamente. Con “analiza_UFMC” se consiguen los datos de ACPR, EVM y NMSE cuyos resultados se muestran en el capítulo 6.

```
function [x, x_2, x_ovs, fo, ovs, PAPR1, PAPR2, dataTxSymbols] =
UFMC_TX(nsubbandas, Df, NPRB, Nslots, ovs, seed)

% Generación de una señal UFMC (Universal Filter Multi Carrier)
% nsubbandas          numero de subportadoras por banda
% Nsubpoport         numero total de subportadoras
%
%
%
%
%% Inicialización de parámetros
filterLen = 43; % similar to cyclic prefix
length // longitud del filtro
slobeAtten = 40; % atenuacion del filtro en
los lobulos exteriores
M = 16; % No. de puntos en la
constelacion: M % Numero de bits por
k=log2(M); % Numero de s?mbolos OFDM
simbolo % Numero de subportadoras
N symb_OFDM = 7*Nslots; % Numero de subportadoras
Nsubport = NPRB*12; % Numero de puntos de
activas % Numero de simbolos MQAM
Nsubport_total = 2^(nextpow2(Nsubport)); % Numero de bits totales
% numero de subportadoras
totales
FFT_size = Nsubport_total; % para obtener centro de
calculo de la FFT. % frecuencia de muestreo
N symb = Nsubport*N symb_OFDM;
num_bits = N symb*k;
nsubportbanda = Nsubport/nsubbandas;
por banda nsubbanda*nsubportbanda<= FFT_size
subbandOffset = FFT_size/2-nsubportbanda*nsubbandas/2;
cada banda
fs = Df*FFT_size*ovs;

%% Generación de la secuencia de información de forma aleatoria
stream = RandStream.create('mrg32k3a', 'NumStreams', 1, 'Seed', seed);

senal_aleatoria = randi(stream, 2, num_bits, 1)-1;

qamMapper = comm.RectangularQAMModulator('ModulationOrder', ...
M, 'BitInput', true, ...
'NormalizationMethod', 'Average power');
X=qamMapper(senal_aleatoria);

%% Inicialización de matrices para UFMC
prototypeFilter = chebwin(filterLen, slobeAtten);

%Matriz para cada simbolo
txSig = complex(zeros(FFT_size+filterLen-1, N symb_OFDM));
%Matriz_total
txSig final = complex(zeros(FFT_size+filterLen-1, N symb_OFDM)); TotalSymbolInOFDM=
complex(zeros(FFT_size, N symb_OFDM));
```

```

dataTxSymbols = reshape(X,Nsubport,Nsymb_OFDM);

%% Generación señal UFMC
% Bucle sobre cada subbanda y cada simbolo
for bandIdx = 1:nsubbandas
    for ns=1:Nsymb_OFDM

        %offset de cada subbanda
        offset = subbandOffset+(bandIdx-1)*nsubportbanda;
        %cogemos los simbolos que corresponden a esta subbanda
        symbolsIn=dataTxSymbols((bandIdx-1)*nsubportbanda+1:bandIdx*nsubportbanda,ns);
        %los introducimos en una matriz del tamaño del numero de subportadoras totales
        symbolsInOFDM = [zeros(offset,1); symbolsIn; ...
            zeros(FFT_size-offset-nsubportbanda,1)];
        TotalSymbolInOFDM= TotalSymbolInOFDM + symbolsInOFDM;
        %se realiza la ifft de los simbolos
        ifftOut = ifft(iffshift(symbolsInOFDM));

        % El filtro para cada subbanda se desplaza en frecuencia
        bandFilter = prototypeFilter.*exp( 1i*2*pi*(0:filterLen-1)/FFT_size* ...
            ((bandIdx-1/2)*nsubportbanda+0.5+subbandOffset+FFT_size/2) );
        filterOut = conv(bandFilter,ifftOut);

        % Suma las respuestas de subbanda filtradas para formar la señal de
transmision final
        txSig(:,ns) = filterOut;
    end
    txSig_final = txSig_final + txSig;
end

txSig_final_2 = txSig_final(:);
x = txSig_final_2;
x_2 = txSig_final;

%% Calcula el PAPR de la señal

PAPRcalc = comm.CCDF('PAPROutputPort', true, 'PowerUnits', 'dBW');
[~,~,paprUFMC] = PAPRcalc(txSig_final_2);
PAPR1 = paprUFMC;
disp(['Peak-to-Average-Power-Ratio (PAPR) for UFMC = ' num2str(paprUFMC) ' dB']);

%% Añadimos sobremuestreo con FFT_interpolate
fo = Df*FFT_size;

ovs = fs/fo;

txSig_ovs = FFTinterpolate(txSig_final_2,fo,fs);

x_ovs = txSig_ovs;

PAPRcalc = comm.CCDF('PAPROutputPort', true, 'PowerUnits', 'dBW');
[~,~,paprUFMC2] = PAPRcalc(txSig_ovs);
PAPR2 = paprUFMC2;
disp(['Peak-to-Average-Power-Ratio (PAPR) for UFMC after interpolate = '
num2str(paprUFMC2) ' dB']);
end

```

```

function y = FFTinterpolate(x, fs_y, fs_u, varargin)
%function: x_resampled = FFTinterpolate(u, fs_y, fs_u);
%x is the signal to resample
%fs_y is the desired (new) sampling rate of the output signal x_resampled
%fs_x is the sampling rate of u

if ~(fs_u == fs_y)
    N = length(x);
    [P, Q] = resample_quotients(fs_u, fs_y);
    Nn = N*P/Q;
    U = fft(x)/sqrt(N);
    if round(Nn)==Nn %Check for integer number of samples, restriction with this
method
        Y(Nn,1)= 1i*1e-16;

        %Check if upsampling or downsampling
        if P > Q %Upsampling
            if mod(Nn,2)==0 %If even number of samples, easy to put back in the vector
                if mod(N,2)==0 %Even number of samples in u
                    Y(1:N/2,1) = U(1:N/2);
                    Y(Nn-N/2+1:Nn) = U(N/2+1:N);
                else
                    Y(1:floor(N/2),1) = U(1:floor(N/2));
                    Y(Nn-ceil(N/2)+1:Nn,1) = U(floor(N/2)+1:N);
                end
            else
                error('Not implemented')
            end
            y = ifft(Y)*sqrt(Nn);
        else %Downsampling
            Y(1:ceil(Nn/2)) = U(1:ceil(Nn/2));
            Y(Nn-ceil(Nn/2)+1:Nn) = U(N-ceil(Nn/2)+1:N);
            y = ifft(Y)*sqrt(Nn); %this scaling preserves norm
        end
    else
        error('Not an integer number of samples. Use some other method')
    end
end
else
    y = x;
end
end

function [P, Q] = resample_quotients(fs1, fs2)
%Compute the P and Q resampling coefficients to be used in FFTinterpolate
v1 = factor(fs1);
v2 = factor(fs2);
total_ind = [];
for k=1:length(v1)
    %If we can find element k of v1 in v2
    if ismember(v1(k), v2)
        %Find first index in v2 where it can be found
        ind = find(v1(k)==v2,1);
        %Remove the value at index k from v1
        total_ind = [total_ind k];
        %Remove the value at index ind from v2
        v2 = [v2(1:ind-1) v2(ind+1:end)];
    end
end
%P is the product of the remaining elements in v1
P = prod( v1(setdiff(1:length(v1), total_ind)));
Q = prod(v2);
end

```

```

function rx = UFMC_RX(Nslots,NPRB,nsubbandas,snrdB,txSig_final,Df,ovs,seed)

```

```

%% Inicialización de parámetros

filterLen = 43; % similar to cyclic prefix
length // longitud del filtro
slopeAtten = 40; % atenuación del filtro en
los lobulos exteriores
M = 16; % No. de puntos en la
constelaci?n: M
k=log2(M); % Numero de bits por
simbolo
Nsymb_OFDM = 7*Nslots; % Numero de s?mbolos OFDM
Nsubport = NPRB*12; % Numero de subportadoras
activas
Nsubport_total = 2^(nextpow2(Nsubport)); % Numero de subportadoras
totales
FFT_size = Nsubport_total; % Numero de puntos de
calculo de la FFT.
nsubportbanda = Nsubport/nsubbandas; % numero de subportadoras
por banda nsubbanda*nsubportbanda<= FFT_size
subbandOffset = FFT_size/2-nsubportbanda*nsubbandas/2; % para obtener centro de
cada banda
Nsymb = Nsubport*Nsymb_OFDM; % Numero de simbolos MQAM
num_bits = Nsymb*k; % Numero de bits totales
fo = Df*FFT_size;
fs = fo * ovs;

%% Generación de la secuencia de información de forma aleatoria

stream = RandStream.create('mrg32k3a', 'NumStreams', 1, 'Seed', seed);

senal_aleatoria = randi(stream, 2, num_bits, 1) - 1;

prototypeFilter = chebwin(filterLen, slopeAtten);

%%recepción
% Add WGN

rxSig = awgn(txSig_final, snrdB, 'measured');

rxSig0 = FFTinterpolate(rxSig, fs, fo);

rxSig1 = reshape(rxSig0, FFT_size+filterLen-1, Nsymb_OFDM);

% Pad receive vector to twice the FFT Length (note use of txSig as input)
% No windowing or additional filtering adopted
yRxPadded = [rxSig1; zeros(2*FFT_size-numel(rxSig1(:,1)), Nsymb_OFDM)];
offset2 = subbandOffset+(1:nsubbandas*nsubportbanda);
for nsimb=1:Nsymb_OFDM
    % Perform FFT and downsample by 2
    RxSymbols2x(:, nsimb) = fftshift(fft(yRxPadded(:, nsimb)));
    RxSymbols(:, nsimb) = RxSymbols2x(1:2:end, nsimb);
    % Select data subcarriers
    dataRxSymbols(:, nsimb) = RxSymbols(offset2, nsimb);
end

% Plot received symbols constellation
constDiagRx = comm.ConstellationDiagram('ShowReferenceConstellation', ...
    false, 'Position', figposition([20 15 25 30]), ...
    'Title', 'UFMC Pre-Equalization Symbols', ...
    'Name', 'UFMC Reception', ...
    'XLimits', [-150 150], 'YLimits', [-150 150]);
constDiagRx(dataRxSymbols(:));

% Use zero-forcing equalizer after OFDM demodulation

```

```

rx = [prototypeFilter.*exp(1i*2*pi*0.5*(0:filterLen-1)'/FFT_size); ...
      zeros(FFT_size-filterLen,1)];
prototypeFilterFreq = fftshift(fft(rxf));
prototypeFilterInv = 1./prototypeFilterFreq(FFT_size/2-
floor(nsubportbanda/2)+(1:nsubportbanda));

% Equalize per subband - undo the filter distortion constelacion
for nsimb2=1:Nsymb_OFDM
dataRxSymbolsMat = reshape(dataRxSymbols(:,nsimb2),nsubportbanda,nsubbandas);
EqualizedRxSymbolsMat = bsxfun(@times,dataRxSymbolsMat,prototypeFilterInv);
EqualizedRxSymbols(:,nsimb2) = EqualizedRxSymbolsMat(:);
end

% Plot equalized symbols constellation
constDiagEq = comm.ConstellationDiagram('ShowReferenceConstellation', ...
false, 'Position', figposition([46 15 25 30]), ...
'Title', 'UFMC Equalized Symbols', ...
'Name', 'UFMC Equalization');
constDiagEq(EqualizedRxSymbols(:));

rx = EqualizedRxSymbols(:);

% Demapping and BER computation
qamDemod = comm.RectangularQAMDemodulator('ModulationOrder', ...
M, 'BitOutput', true, ...
'NormalizationMethod', 'Average power');
BER = comm.ErrorRate;

% Perform hard decision and measure errors
rxBits = qamDemod(EqualizedRxSymbols(:));
ber = BER(senal_aleatoria, rxBits);

disp(['UFMC Reception, BER = ' num2str(ber(1)) ' at SNR = ' ...
num2str(snrdB) ' dB']);

pause;
end

```

```

function [x,x_ovs,fo,ovs,PAPR1,PAPR2,PAPR1_cp,BW,X2] =
OFDM_5GNR(NPRB,Df,fs,seed,Nslots)
% Generacion de una senal OFDM con parámetros de 5G NR
% NPRB: Vector con PRBs activos. Cada PRB contiene 12 subportadoras
%      adyacentes y 7 simbolos OFDM. Por ejemplo, con Df=15 KHz:
%      25 PRBs=5 MHz, 50 PRBs=10 MHz, 75 PRBs=15 MHz y 100 PRBs=20 MHz.
%      Anchos de banda [1.4 3 5 10 15 20 25 30 40 50 60 80 90 100] MHz
% Df: Vector con separaciones entre subortadoras [15e3 30e3 60e3]
% Poff: Frecuencia de offset de la banda en Hz
% fs: Frecuencia de muestreo de la se?al en Hz.
%      En principio, fs = Df*FFT_size*ovs
% Nslots: Numero de slots a contemplar. Cada slot estandar contiene 14
%         simbolos. Existen mini-slots de 2, 4 o 7 simbolos.
%         Usaremos mini-slots de 7 simbolos.

%%si no se introduce ninguna variable
if(nargin==0)
seed = 36;
NPRB = 25;
Df = 30e3;
fs = 30e3*512*6;
Nslots = 16;
end

```

```

%Inicialización de parámetros

M = 16; % No. de puntos en la constelaci?n: M
k=log2(M); % Numero de bits por simbolo
Nsubymb_OFDM = 7*Nslots; % Numero de s?mbolos OFDM
Nsubport = NPRB*12; % Numero de subportadoras activas
Nsubport_total = 2^(nextpow2(Nsubport)); % Numero de subportadoras totales
FFT_size = Nsubport_total; % Numero de puntos de calculo de la FFT.
Nsubymb = Nsubport*Nsubymb_OFDM; % Numero de simbolos MQAM
num_bits = Nsubymb*k; % Numero de bits totales
filterLen = 43; % Longitud del filtro ufmc para igualarlo
a la longitud del cp

%Posibilidades de anchos de banda para distinto numero de portadoras y PRBS activos
BWcanal = [1.4 3 5 10 15 20 30 40 50 60 80 90 100];
Nport = [73 181 301 601 901 1201];
NPRBs = [6 15 25 50 75 100];

%calculamos el ancho de banda
indsig = NPRB==NPRBs;

BWeff = Nport(indsig)*Df*1e-6;
ind_BW = find((BWcanal>BWeff), 1 );
BW = BWcanal(ind_BW);
PRB_activos = (1:NPRB);

%generación de la matriz de subportadoras activas

for k = 1:NPRB
    if ~isempty(find(PRB_activos == k, 1))
        aux(12*(k-1)+1:12*(k-1)+12) = ones(12,1);
    else
        aux(12*(k-1)+1:12*(k-1)+12) = zeros(12,1);
    end
end
subportadoras_activas = [zeros((FFT_size-Nsubport)/2,1); aux(1:Nsubport/2).'; 0;
aux(Nsubport/2+1:end).'; zeros((FFT_size-Nsubport)/2-1,1)];

%%Generación de la secuencia de información de forma aleatoria

stream = RandStream.create('mrg32k3a', 'NumStreams',1, 'Seed', seed);

senal_aleatoria = randi(stream, 2,num_bits,1)-1;

qamMapper = comm.RectangularQAMModulator('ModulationOrder', ...
M, 'BitInput', true, ...
'NormalizationMethod', 'Average power');
X=qamMapper(senal_aleatoria);
X2 = X;

%% Crear la matriz con todas las subportadoras, activas y no activas
XX = zeros(FFT_size, Nsubymb_OFDM);

% Insertar los datos en las posiciones adecuadas.
cont_X = 1;
for cont_XX = 1:FFT_size*Nsubymb_OFDM
    indice = mod(cont_XX,FFT_size); % Esto va devolviendo la subportadora que se
quiere analizar entre 1 y 2048
    if indice == 0, indice = FFT_size; end
    if subportadoras_activas(indice)
        XX(cont_XX) = X(cont_X);
    end
end

```

```

        cont_X = cont_X + 1;
    end
end
% salvas de la xteor para sincronizar
X = XX(:);

xxteor = ifft(fftshift(XX,1));
xteor = xxteor(:);

% CP

NCP0 = filterLen - 1;

xxteor_cp = [xxteor(end-NCP0+1:end, :); xxteor];

xteor_cp = xxteor_cp(:);

x=xteor_cp;

% Calculo PAPR de la señal
PAPRcalc = comm.CCDF('PAPROutputPort', true, 'PowerUnits', 'dBW');
[~,~,paprOFDM] = PAPRcalc(xteor);
PAPR1 = paprOFDM;
disp(['Peak-to-Average-Power-Ratio (PAPR) for OFDM = ' num2str(paprOFDM) ' dB']);

PAPRcalc = comm.CCDF('PAPROutputPort', true, 'PowerUnits', 'dBW');
[~,~,paprCP] = PAPRcalc(xteor_cp);
PAPR1_cp = paprCP;
disp(['Peak-to-Average-Power-Ratio (PAPR) for OFDM with cp = ' num2str(paprCP) ' dB']);

% Añadimos sobremuestreo con FFT_interpolate
fo = Df*FFT_size;

ovs = fs/fo;

xteor_ovs = FFTinterpolate(xteor_cp,fo,fs);

x_ovs = xteor_ovs;

PAPRcalc = comm.CCDF('PAPROutputPort', true, 'PowerUnits', 'dBW');
[~,~,paprOFDM2] = PAPRcalc(xteor_ovs);
PAPR2 = paprOFDM2;
disp(['Peak-to-Average-Power-Ratio (PAPR) for OFDM after interpolate = ' num2str(paprOFDM2) ' dB']);
end

```

```

function [dataFinalSymbols, rx_no_cp] = OFDM_5GNR_RX(Nslots,NPRB,Df,ovs,snrdB,rx,seed)
%
%
%     Receptor con ruido blanco de OFDM para 5GNR con cp
%
%
%
%
%
%Inicialización de parámetros

```

```

M = 16; % No. de puntos en la constelaci?n: M
k=log2(M); % Numero de bits por simbolo
Nsymb_OFDM = 7*Nslots; % Numero de s?mbolos OFDM
Nsubport = NPRB*12; % Numero de subportadoras activas
Nsubport_total = 2^(nextpow2(Nsubport)); % Numero de subportadoras totales
FFT_size = Nsubport_total; % Numero de puntos de calculo de la FFT.
Nsymb = Nsubport*Nsymb_OFDM; % Numero de simbolos MQAM
num_bits = Nsymb*k; % Numero de bits totales
fo = Df*FFT_size;
fs = fo * ovs;
filterLen = 43;
NCP0 = filterLen - 1;

%%Generaci?n de la secuencia de informaci?n de forma aleatoria

stream = RandStream.create('mrg32k3a', 'NumStreams', 1, 'Seed', seed);

senal_aleatoria = randi(stream, 2, num_bits, 1) - 1;

%%Quitamos CP y sobremuestreo

rxSig = awgn(rx, snrdB, 'measured');

rxSig0 = FFTinterpolate(rxSig, fs, fo);

rxSig1 = reshape(rxSig0, (FFT_size+NCP0), Nsymb_OFDM);

rxSig2 = rxSig1(NCP0+1:end, :);

rx_no_cp = rxSig2(:);

%%Demodulamos aplicando la fft y cogemos las portadoras con informacion
rx_total = fftshift(fft(rxSig2), 1);

Offset = (FFT_size - Nsubport) / 2;

dataRxSymbols(1:Nsubport/2, :) = rx_total(Offset+1:FFT_size/2, :);

dataRxSymbols((1:Nsubport/2)+Nsubport/2, :) = rx_total(FFT_size/2+2:FFT_size-Offset+1, :);

dataFinalSymbols = dataRxSymbols(:);

%%Constelaci?n

constDiagRx = comm.ConstellationDiagram('ShowReferenceConstellation', ...
    false, 'Position', figposition([20 15 25 30]), ...
    'Title', 'OFDM symbols', ...
    'Name', 'UFMC Reception');

constDiagRx(dataFinalSymbols(:));

%%Demodulaci?n y BER

qamDemod = comm.RectangularQAMDemodulator('ModulationOrder', ...
    M, 'BitOutput', true, ...
    'NormalizationMethod', 'Average power');
BER = comm.ErrorRate;

% Perform hard decision and measure errors

```

```

rxBits = gamDemod(dataFinalSymbols);
ber = BER(senal_aleatoria, rxBits);

disp(['OFDM 5GNR Reception, BER = ' num2str(ber(1)) ' at SNR = ' ...
      num2str(snrdB) ' dB']);

pause;
end

```

```

function [nmse_med, evm_rms_med,ACPR,ACPR2] = analiza_medidas_UFMC(xsw, med, NPRB,
Nslots, Df, ovs, nsubbandas, snrdB, seed)
color = 'b';

s_tx = UFMC_RX(Nslots,NPRB,nsubbandas,snrdB,xsw,Df,ovs,seed);

s_txn = round(3*sqrt(2)*s_tx/max(abs(s_tx))*sqrt(2)/3;

%%EVM

medaux = (med/norm(med))*norm(xsw);

s_rx_med = UFMC_RX(Nslots,NPRB,nsubbandas,snrdB,medaux,Df,ovs,seed);

s_rxn_med = sqrt((s_txn'*s_txn)/(s_rx_med'*s_rx_med))*s_rx_med;

figure('Name','Constelacion'), plot(s_rxn_med, 'Color', color, 'Marker', 'o', ...
    'MarkerFaceColor', color, 'MarkerSize',5, ...
    'LineStyle', 'none'); hold on, grid on;
plot(s_txn, 'Color', 'g', 'Marker', '+', ...
    'MarkerFaceColor', 'g', 'MarkerSize',5, ...
    'LineStyle', 'none');

% M?tricas de EVM
evm_rms_med = norm(s_rxn_med - s_txn)/norm(s_txn)*100;

%Inicialización de parámetros

BWcanal = [1.4 3 5 10 15 20 30 40 50 60 80 90 100];

Nport = [73 181 301 601 901 1201];

NPRBs = [6 15 25 50 75 100];

indsig = NPRB==NPRBs;

Ncarrier = Nport(indsig)-1;

BWeff = Nport(indsig)*Df*1e-6;

ind_BW =min(find((BWcanal>BWeff)));

```

```

BW = BWcanal(ind_BW);

M = 16;           % No. de puntos en la constelaci?n: M
k=log2(M);       % N?mero de bits por s?mbolo
Nsymb_OFDM = 7*Nslots; % N?mero de s?mbolos OFDM
Nsubport = NPRB*12; % N?mero de subportadoras activas
Nsubport_total = 2^(nextpow2(Nsubport));
FFT_size = Nsubport_total; % N?mero de puntos de c?lculo de la FFT.
% A veces implica un factor de sobremuestreo en la forma de onda generada.
Nsymb = Nsubport*Nsymb_OFDM; % Numero de simbolos MQAM
num_bits = Nsymb*k;
Rs = Nsubport_total*Df;
Nsamples = Nsubport_total*ovs;
fs = Df*FFT_size*ovs;
fc = 3.6*1e3;
if BW == 5
    offset = 2*BW*1e6;
elseif BW == 10
    offset = 1.5*BW*1e6;
else
    offset = BW*1e6;
end
xsw = xsw - mean(xsw);

med = med - mean(med);

medn2 = sqrt((xsw'*xsw)/(med'*med))*med;

error2 = medn2-xsw;

hs = spectrum.mtm(10);

for indc = 1: Nsymb_OFDM
    PSDymed = psd(hs,medn2((indc-
1)*(length(medn2)/Nsymb_OFDM)+1:indc*(length(medn2)/Nsymb_OFDM)), 'Fs', ovs*Rs,
'CenterDC', 1);
    PSDerror = psd(hs,error2((indc-
1)*(length(error2)/Nsymb_OFDM)+1:indc*(length(error2)/Nsymb_OFDM)), 'Fs', ovs*Rs,
'CenterDC', 1);
    PSDxsw = psd(hs,xsw((indc-
1)*(length(xsw)/Nsymb_OFDM)+1:indc*(length(xsw)/Nsymb_OFDM)), 'Fs', ovs*Rs,
'CenterDC', 1);
    f = PSDymed.Frequencies;
    ccA = [-0.5*Nsubport/Nsubport_total*Rs, 0.5*Nsubport/Nsubport_total*Rs];
    canal = find((f<= ccA(2)) & (f>= ccA(1)));
    YmedccA = 10*log10(mean(PSDymed.Data(canal)));
    PSDymed_dB(:,indc) = 10*log10(PSDymed.Data) - YmedccA;
    PSDerror_dB(:,indc) = 10*log10(PSDerror.Data) - YmedccA;
    PSDxsw_dB(:,indc) = 10*log10(PSDxsw.Data) - YmedccA;

    cc = [-0.5*Df*(Nsubport+1), 0.5*Df*(Nsubport+1)];
    acn = [-offset-0.5*Df*(Nsubport+1), -offset+0.5*Df*(Nsubport+1)];
    acp = [offset-0.5*Df*(Nsubport+1), offset+0.5*Df*(Nsubport+1)];
    Ymedcc(:,indc) = 10*log10(avgpwr(PSDymed, cc))+10;
    Ymedacn(:,indc) = 10*log10(avgpwr(PSDymed, acn))+10;
    Ymedacp(:,indc) = 10*log10(avgpwr(PSDymed, acp))+10;

```

```

    if ovs >= 5
        acn2 = [-2*offset-0.5*Df*(Nsubport+1), -2*offset+0.5*Df*(Nsubport+1)];
        acp2 = [2*offset-0.5*Df*(Nsubport+1), 2*offset+0.5*Df*(Nsubport+1)];
        Ymedacn2(:,indc) = 10*log10(avgpower(PSDymed, acn2))+10;
        Ymedacp2(:,indc) = 10*log10(avgpower(PSDymed, acp2))+10;
    end
end

figure('Name','Espectro'), plot(f*1e-6+fc,mean(PSDymed_dB,2), 'Color', color,
'Marker', 'none',...
'LineWidth',2), hold on, grid on, plot(f*1e-6+fc,mean(PSDerror_dB,2), 'Color',
color, 'Marker', 'none',...
'LineWidth',2, 'LineStyle', ':'), plot(f*1e-6+fc,mean(PSDxsw_dB,2), 'Color', 'red',
'Marker', 'none',...
'LineWidth',2)
line([ccA(1)*1e-6+fc ccA(1)*1e-6+fc],[-350 50], 'Color', [0 0.65 0], 'LineWidth',2)
line([ccA(2)*1e-6+fc ccA(2)*1e-6+fc],[-350 50], 'Color', [0 0.65 0], 'LineWidth',2)

ACPRymed_all_simb = [Ymedacn; Ymedacp] - repmat(Ymedcc, 2, 1);
ACPR = mean(ACPRymed_all_simb,2);

line([ccA(1)*1e-6+fc-offset*1e-6 ccA(1)*1e-6+fc-offset*1e-6],[-350 50], 'Color', [0 0.65
0], 'LineWidth',2)
line([ccA(2)*1e-6+fc-offset*1e-6 ccA(2)*1e-6+fc-offset*1e-6],[-350 50], 'Color', [0 0.65
0], 'LineWidth',2)
line([ccA(1)*1e-6+fc+offset*1e-6 ccA(1)*1e-6+fc+offset*1e-6],[-350 50], 'Color', [0 0.65
0], 'LineWidth',2)
line([ccA(2)*1e-6+fc+offset*1e-6 ccA(2)*1e-6+fc+offset*1e-6],[-350 50], 'Color', [0 0.65
0], 'LineWidth',2)

ACPR2 = [0; 0];
if ovs >= 5
    ACPRymed2_all_simb = [Ymedacn2; Ymedacp2] - repmat(Ymedcc, 2, 1);
    ACPR2 = mean(ACPRymed2_all_simb,2);

    line([ccA(1)*1e-6+fc-2*offset*1e-6 ccA(1)*1e-6+fc-2*offset*1e-6],[-350
50], 'Color', [0 0.65 0], 'LineWidth',2)
    line([ccA(2)*1e-6+fc-2*offset*1e-6 ccA(2)*1e-6+fc-2*offset*1e-6],[-350
50], 'Color', [0 0.65 0], 'LineWidth',2)
    line([ccA(1)*1e-6+fc+2*offset*1e-6 ccA(1)*1e-6+fc+2*offset*1e-6],[-350
50], 'Color', [0 0.65 0], 'LineWidth',2)
    line([ccA(2)*1e-6+fc+2*offset*1e-6 ccA(2)*1e-6+fc+2*offset*1e-6],[-350
50], 'Color', [0 0.65 0], 'LineWidth',2)
end

%% NMSE

ymedn = sqrt((xsw'*xsw)/(med'*med))*med;

ymedn = ymedn - mean(ymedn);

xsw = xsw-mean(xsw);

espectro(xsw,fs,'b.-','xsw');
espectro(ymedn,fs,'r.-','medida');

nmse_med = 20*log10((norm(ymedn-xsw)./norm(xsw)));
end

```


ANEXO B

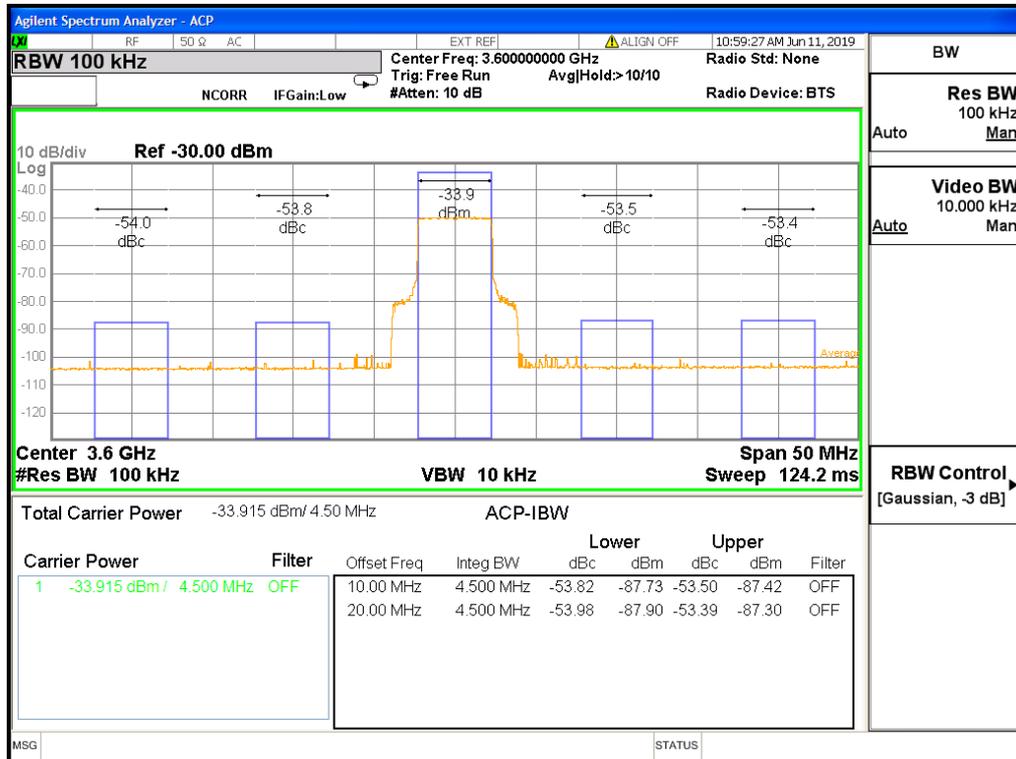


Figura B-1 OFDM con formato 2

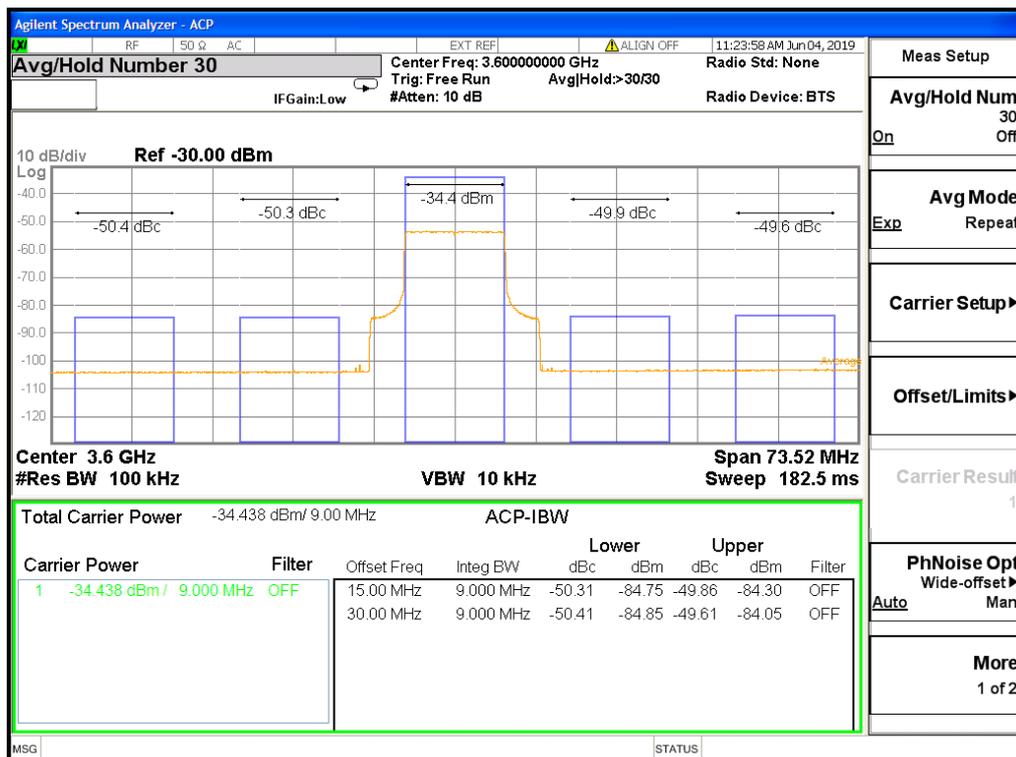


Figura B-2 OFDM con formato 1

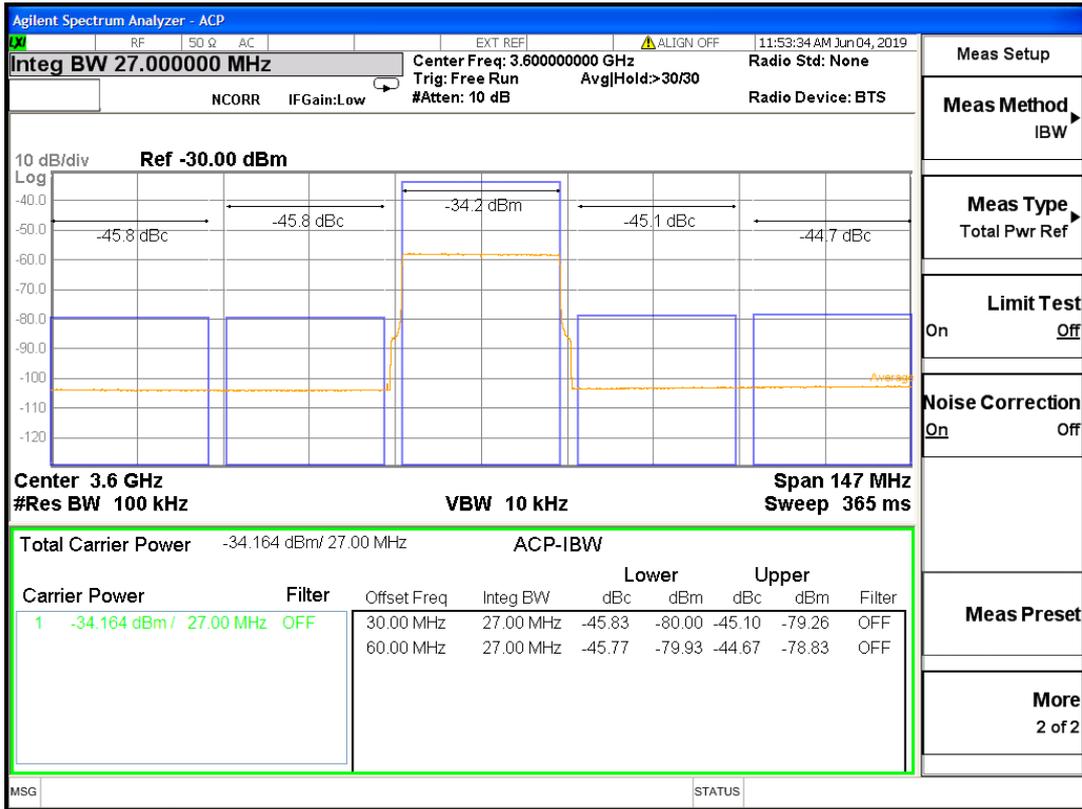


Figura B-3 OFDM con formato 3



Figura B-4 UPMC 1-1

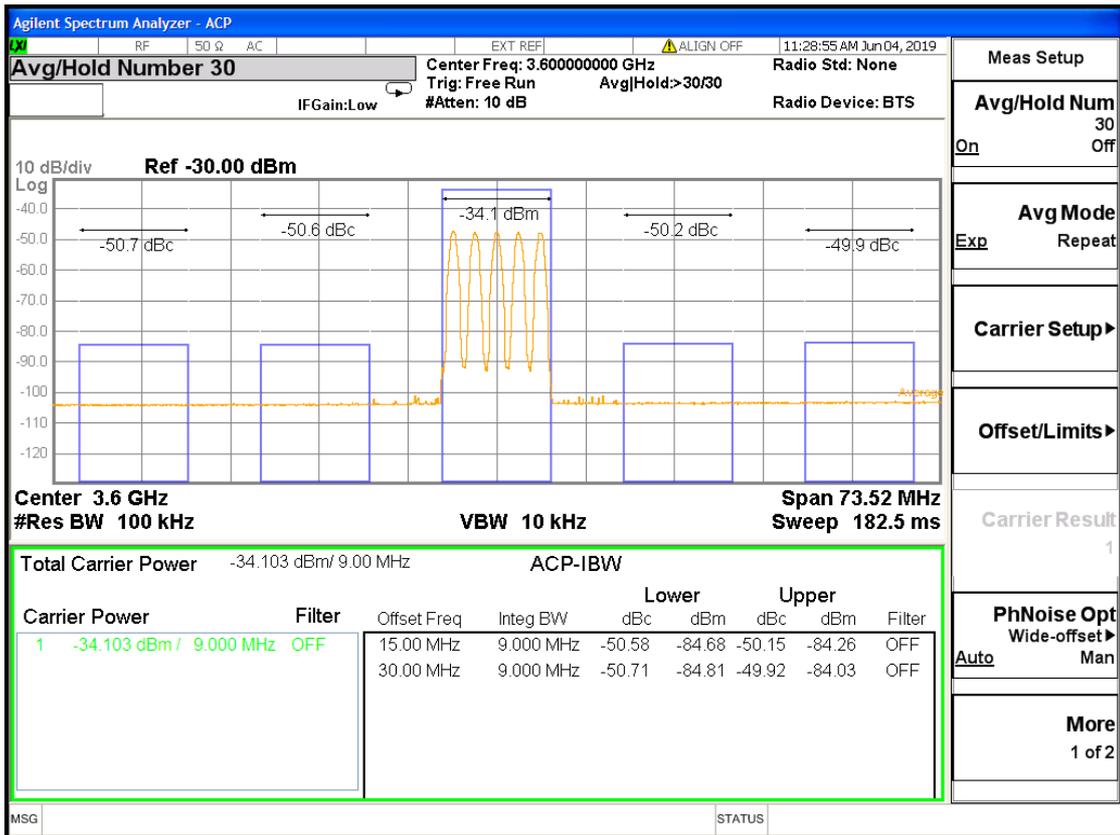


Figura B-5 UFMC 1-5



Figura B-6 UFMC 1-10



Figura B-7 UFMC 1-15



Figura B-8 UFMC 1-30



Figura B-9 UFMC 1-300



Figura B-10 UFMC 2-1



Figura B-11 UPMC 2-5



Figura B-12 UPMC 2-10



Figura B-13UFMC 2-15

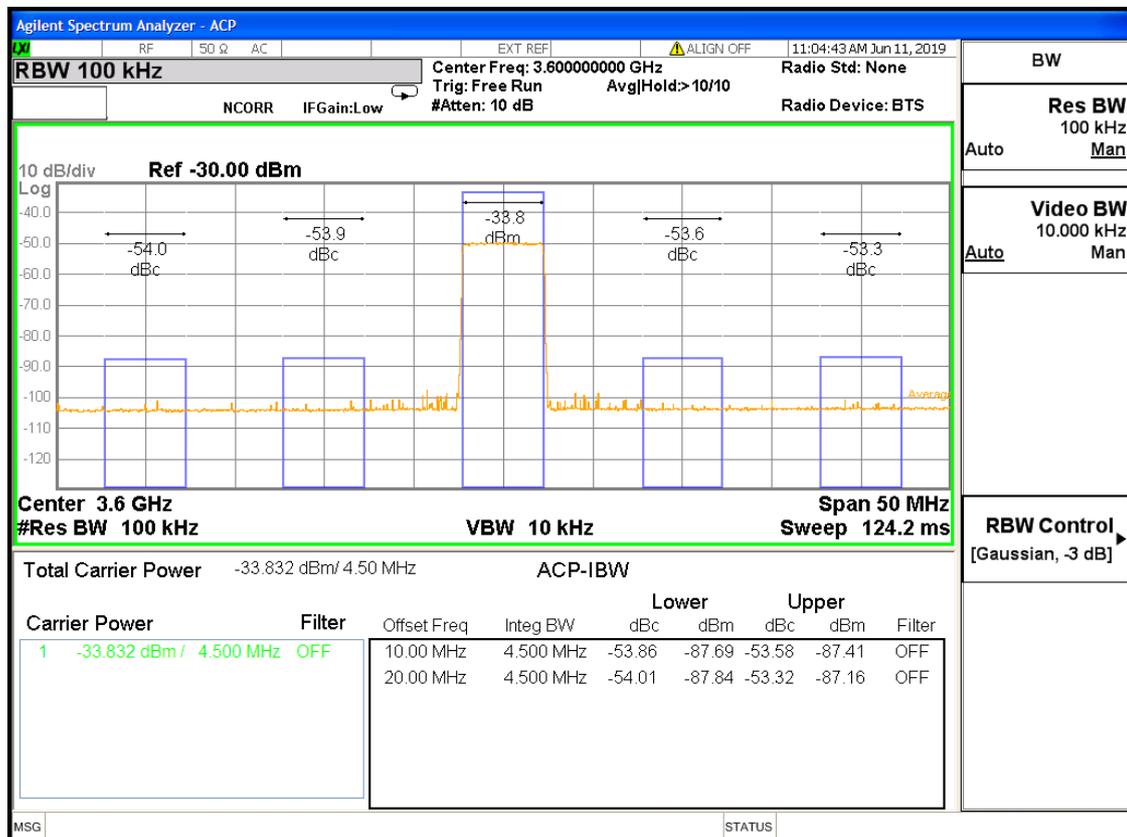


Figura B-14 UFMC 2-30



Figura B-15 UPMC 2-300



Figura B-16 UPMC 3-1



Figura B-17 UFMC 3-5



Figura B-18 UFMC 3-10

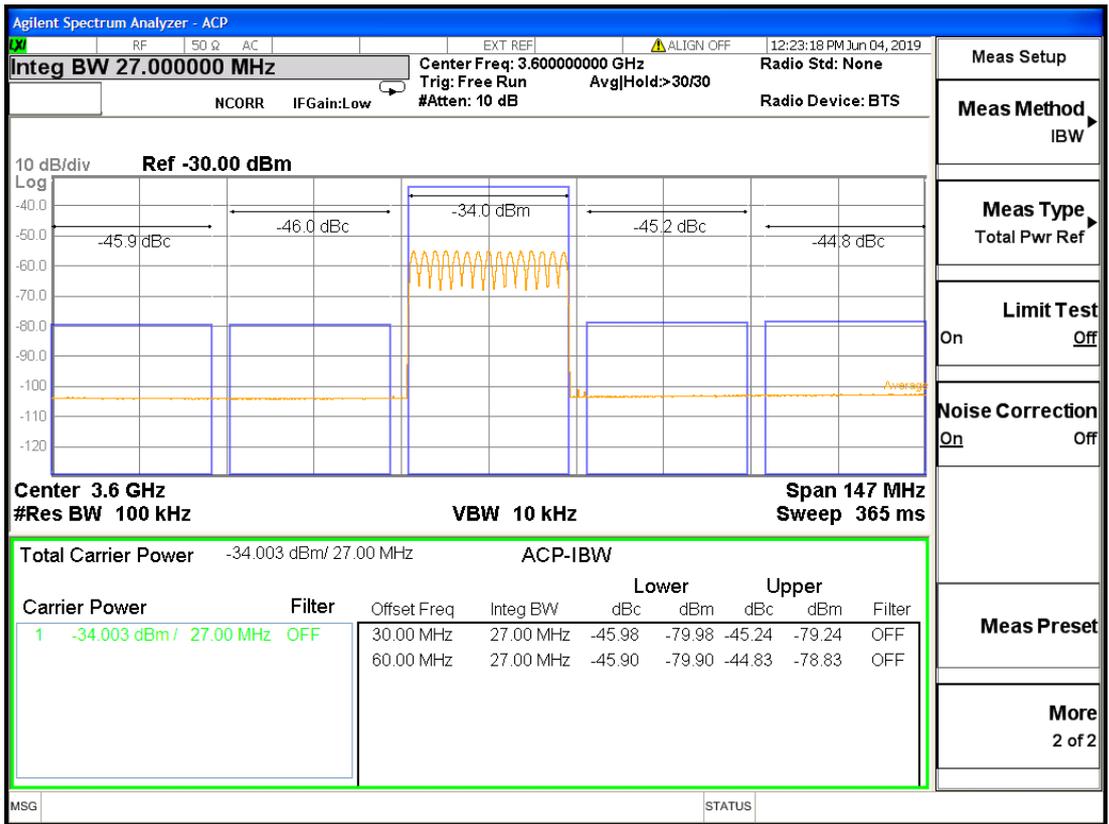


Figura B-19 UPMC 3-15



Figura B-20 UPMC 3-30

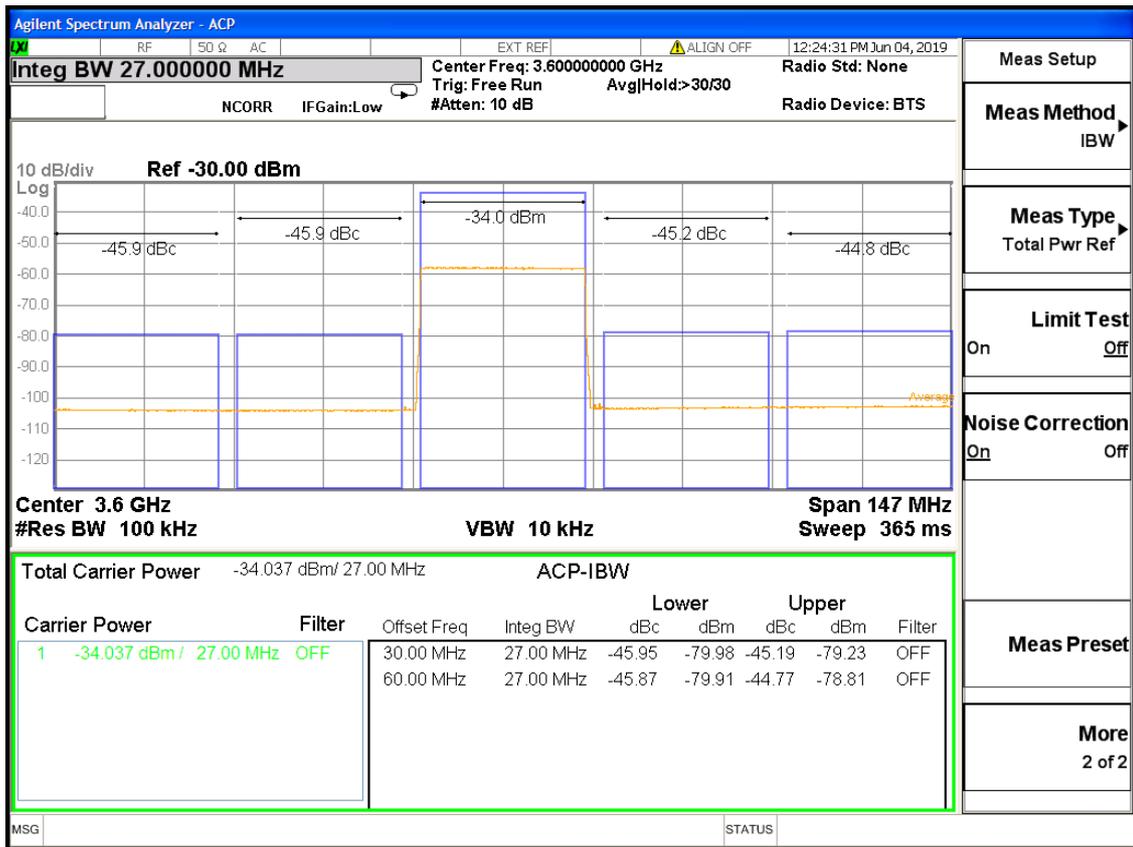


Figura B-21 UFMC 3-300

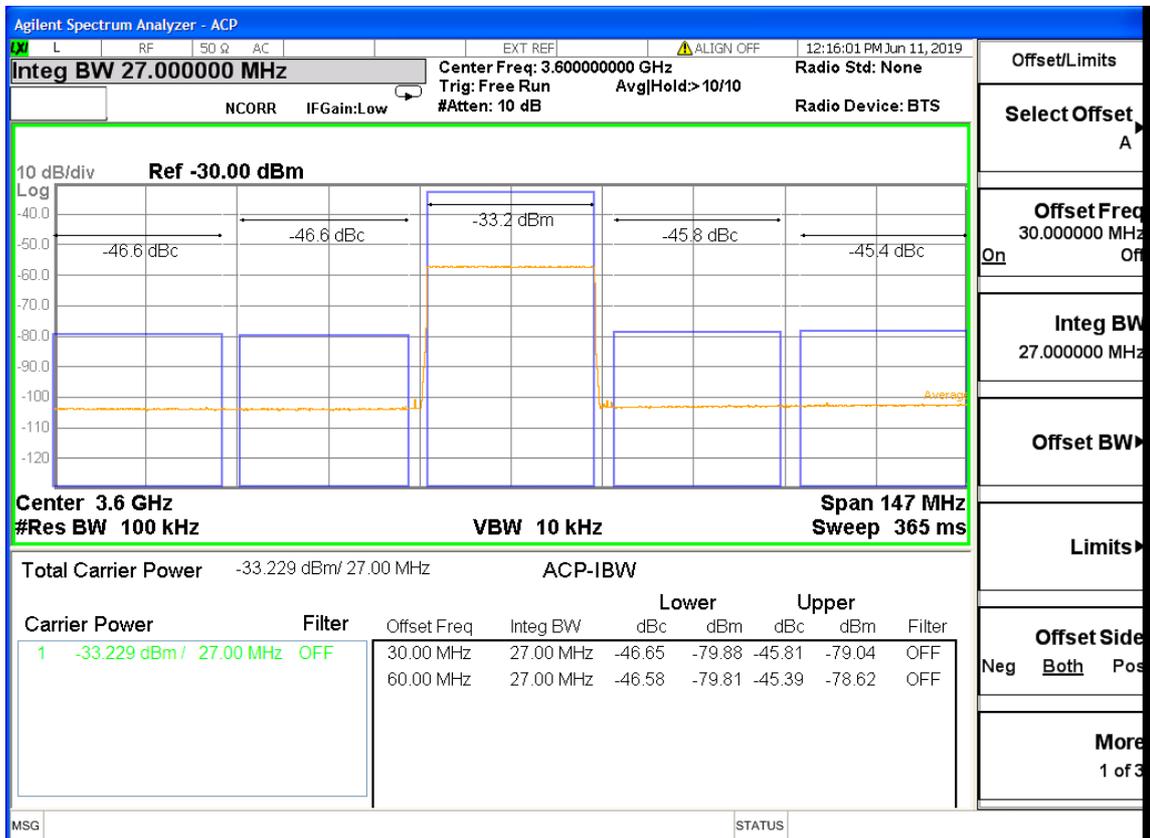


Figura B-22 UFMC 3-900

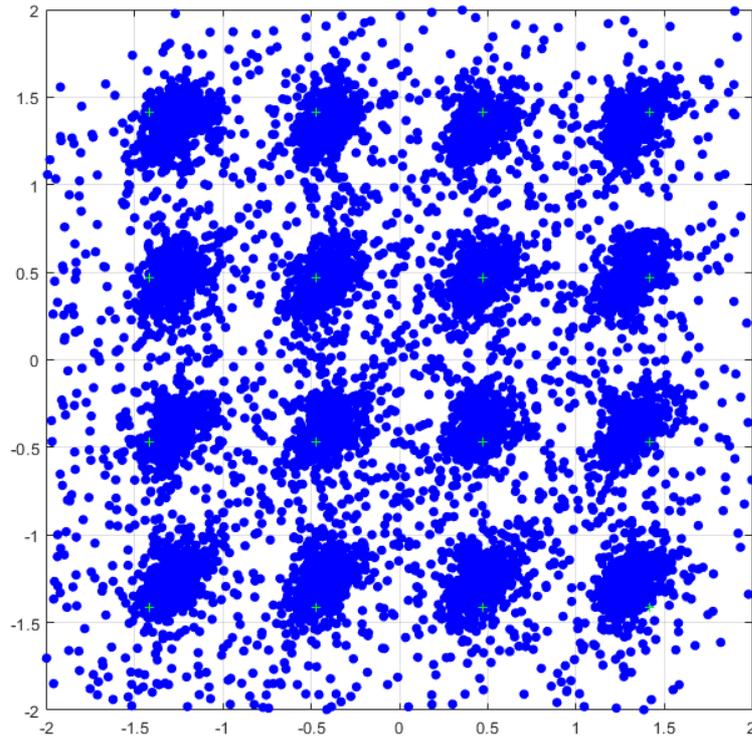


Figura B-23 Constelación UFMC 1-1

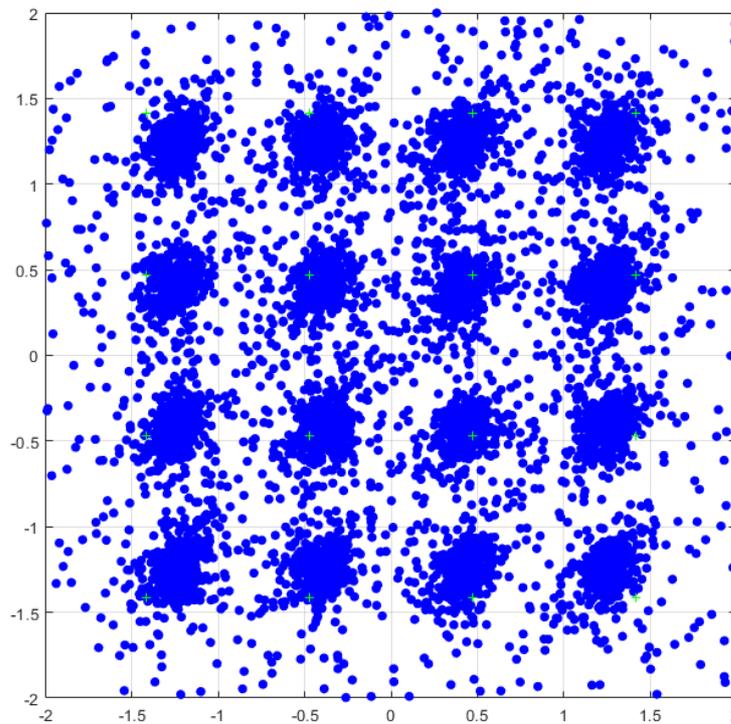


Figura B-24 Constelación UFMC 1-5

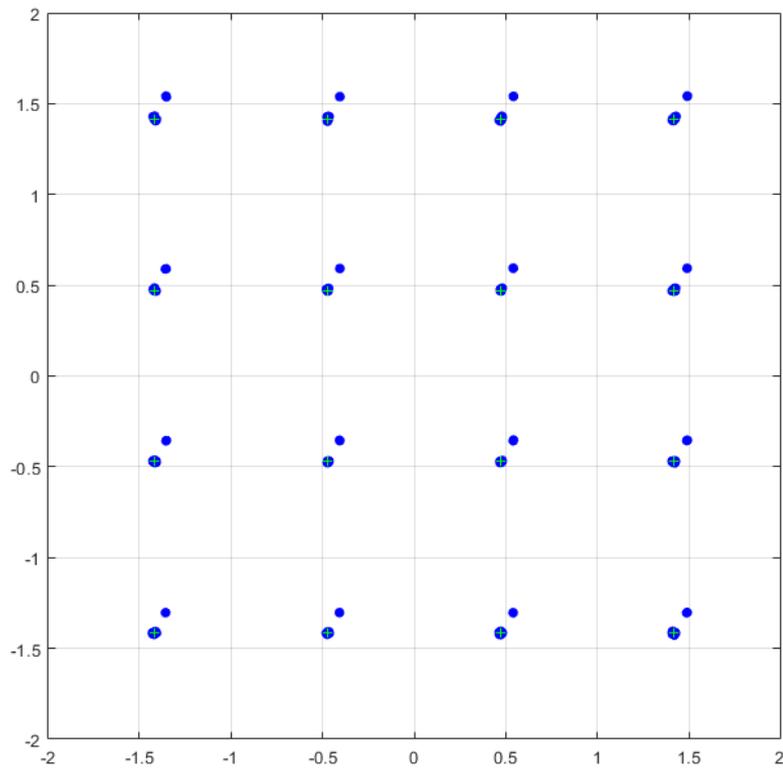


Figura B-25 Constelación UFMC 1-15

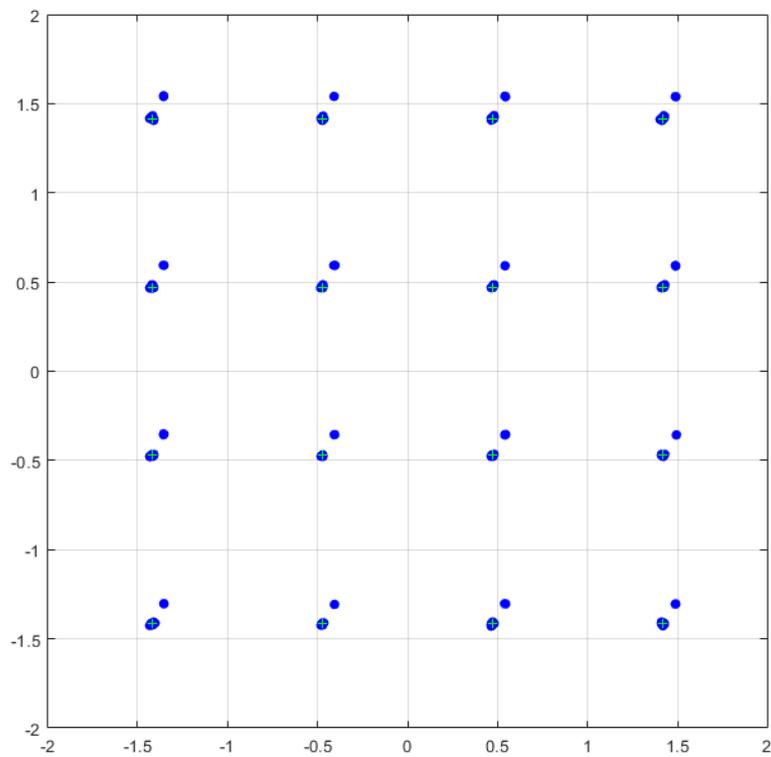


Figura B-26 Constelación UFMC 1-30

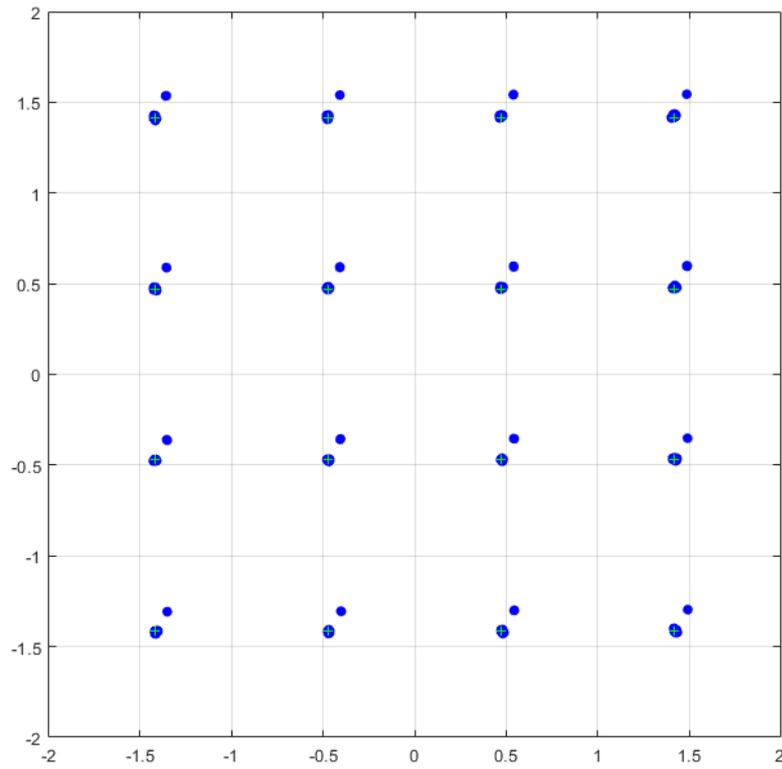


Figura B-27 Constelación UPMC 1-300

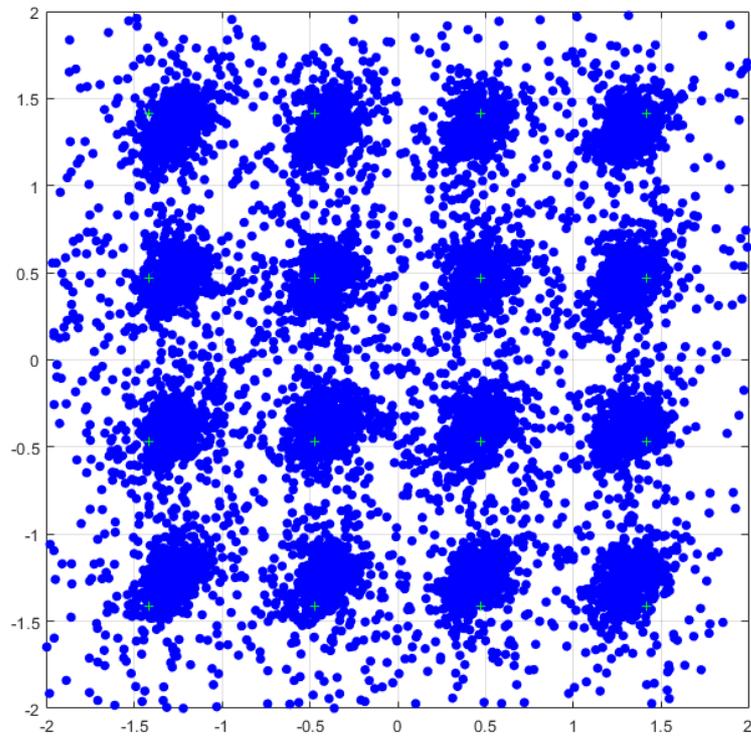


Figura B-28 Constelación UPMC 2-1

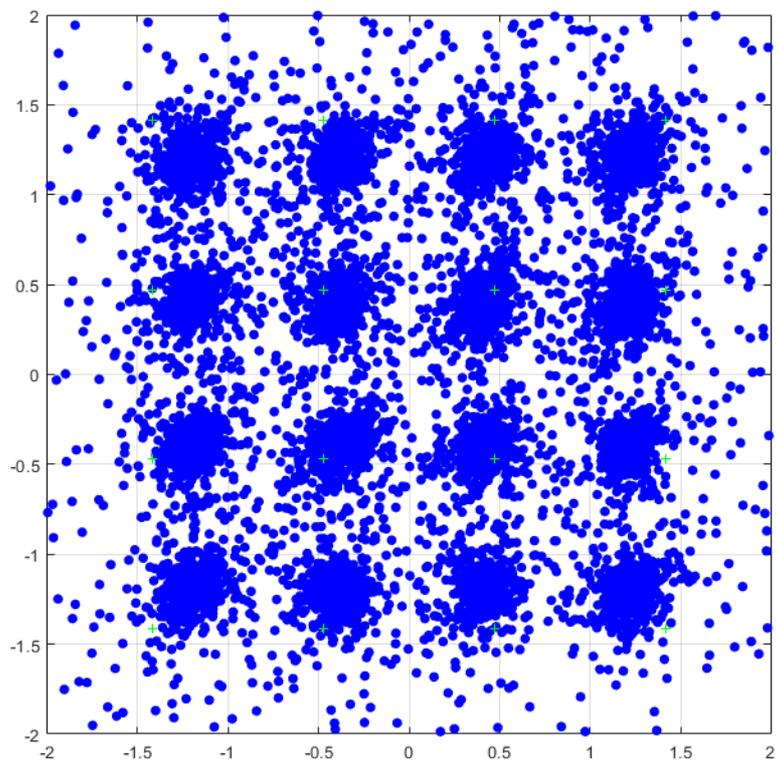


Figura B-29 Constelación UFMC 2-5

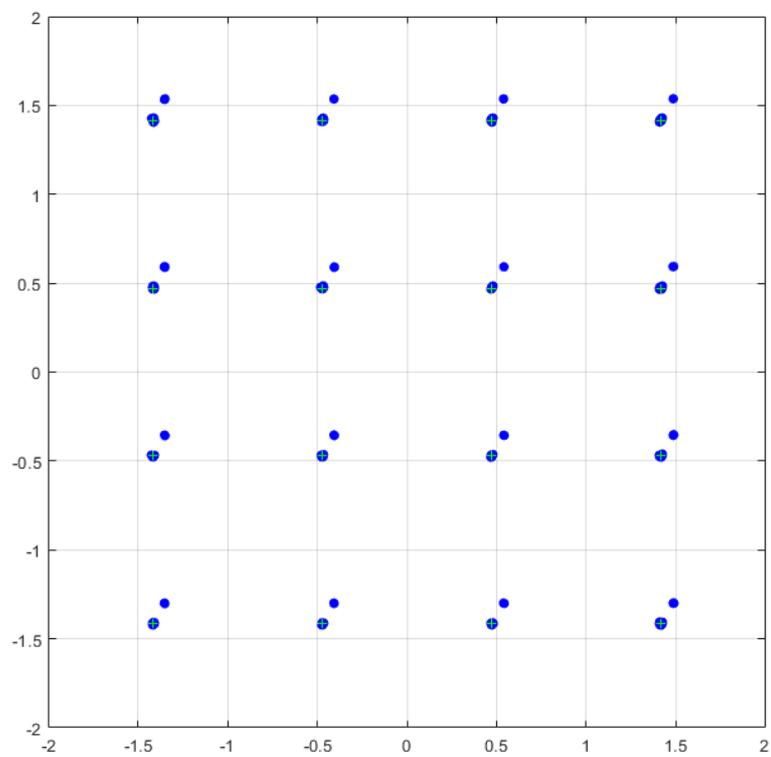


Figura B-30 Constelación UFMC 2-15

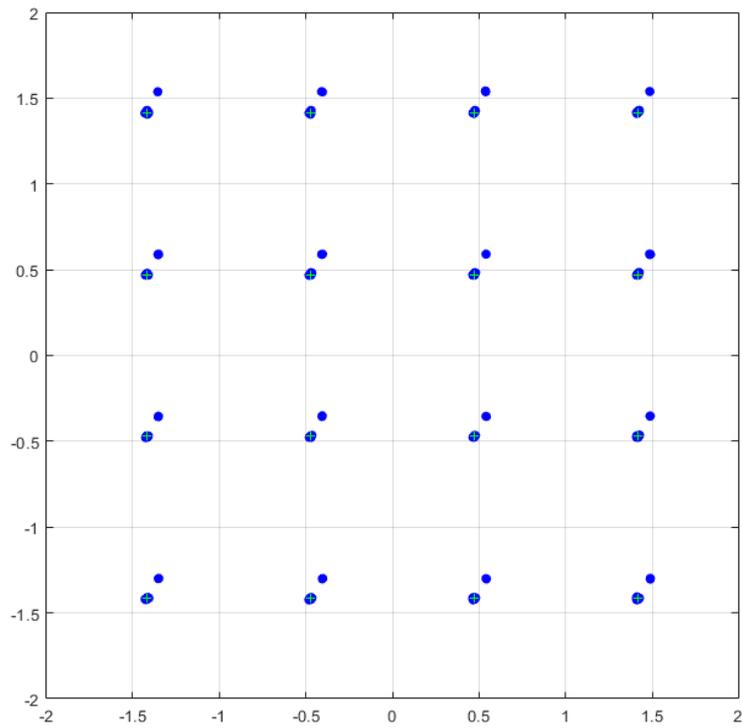


Figura B-31 Constelación UFMC 2-30

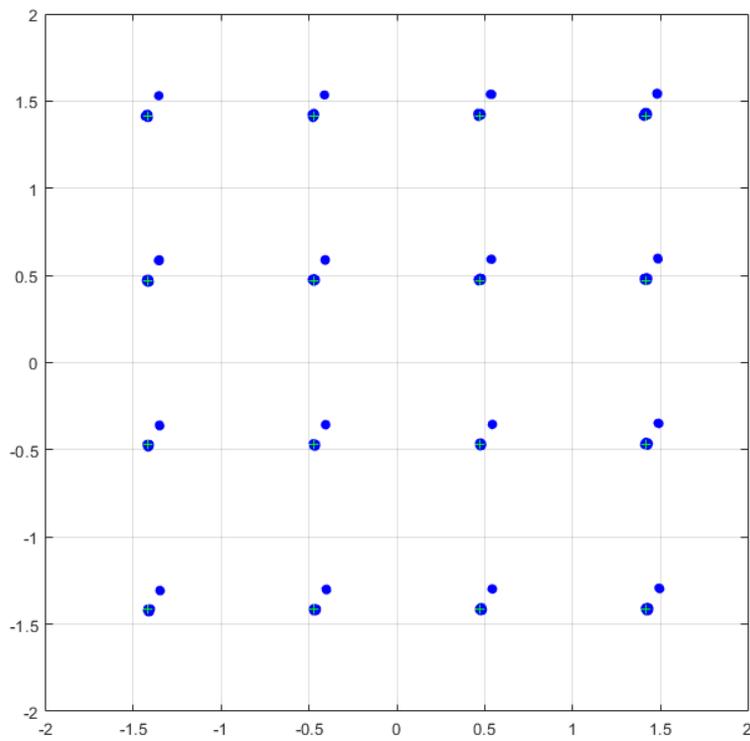


Figura B-32 Constelación UFMC 2-300

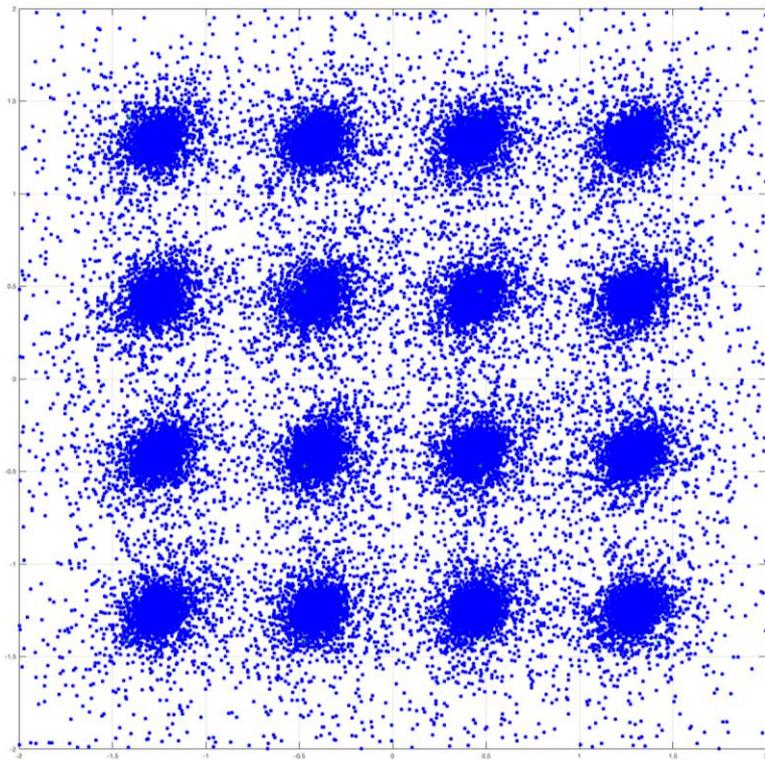


Figura B-33 Constelación UFMC 3-1

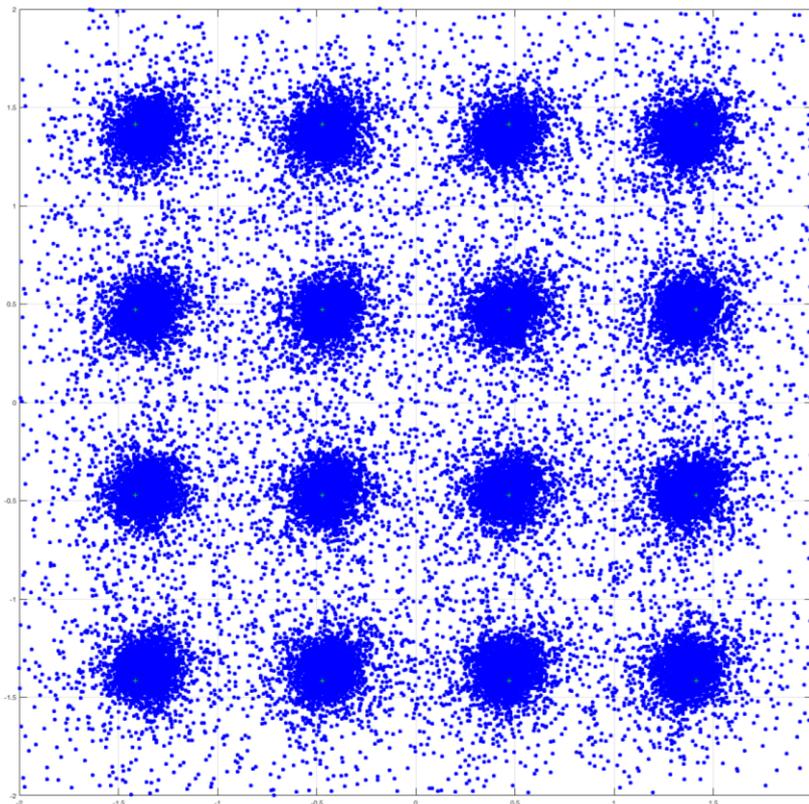


Figura B-34 Constelación UFMC 3-5

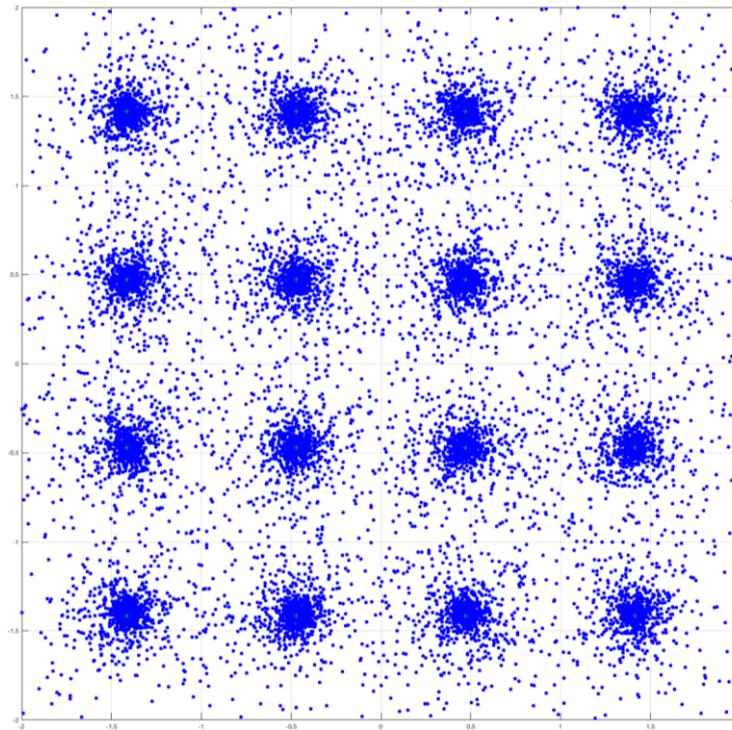


Figura B-35 Constelación UFMC 3-10

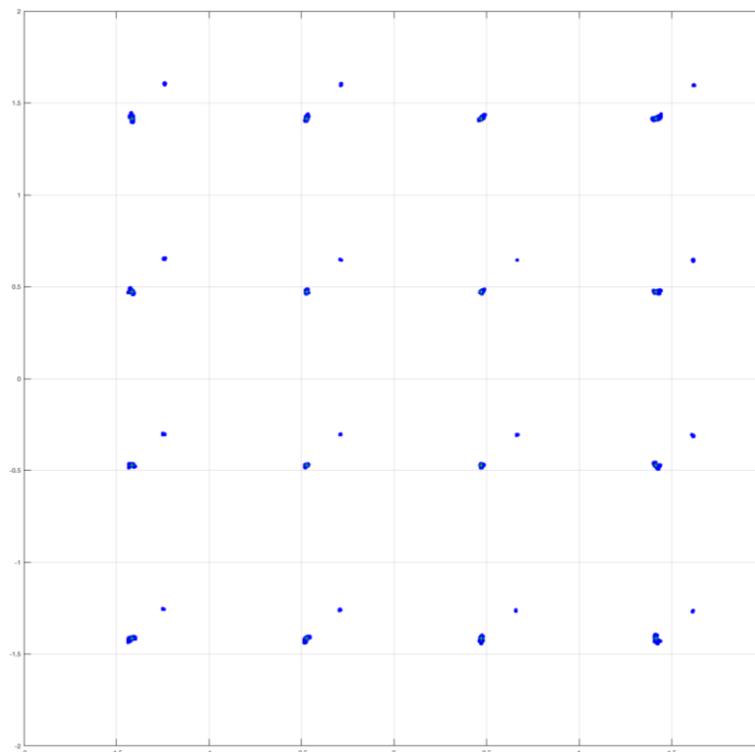


Figura B-36 Constelación UFMC 3-30

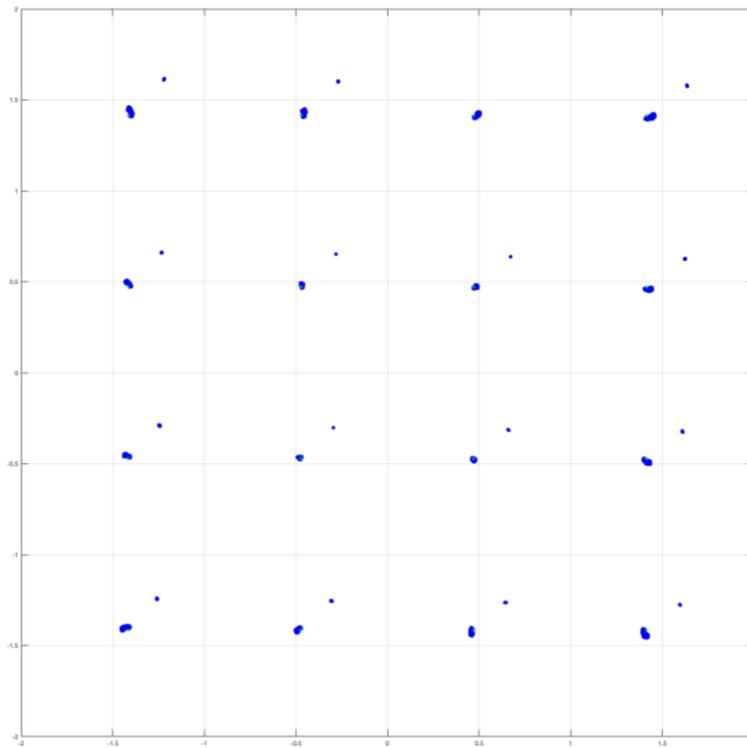


Figura B-37 Constelación UFMC 3-300

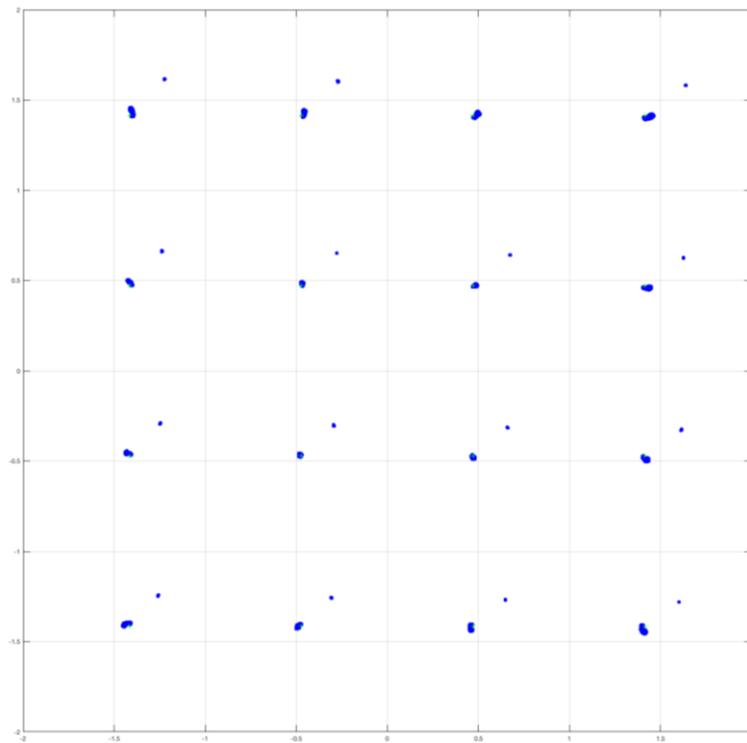


Figura B-38 Constelación UFMC 3-900

REFERENCIAS

- [1] A. Del Valle Díaz, *Diseño, integración y optimización de estaciones base de segunda generación*, Sevilla: Universidad de Sevilla, 2011.
- [2] D. Jiang y G. Liu, *5G Mobile Communications*, Imprint: Springer, 2017.
- [3] M. Allegue Martínez, *Modeling and compensation of non-linear effects in wireless communications systems*, Sevilla: Universidad de Sevilla, 2012.
- [4] F.-L. Luo y C. Zhang, *Signal processing for 5G : algorithms and implementations*, New Jersey: Wiley-IEEE, 2016.
- [5] J. M. Hernando, J. M. Vázquez y C. Lluch, «Modulación y multiacceso 5G NR: Visión actual del estándar de capa física,» *BIT*, nº 211, pp. 61-63, 2019.
- [6] J. M. Hernando Rábanos, C. Lluch Mesquida y J. M. Vázquez Burgos, «Tendencias: Modulación y multiacceso en 5G,» *BIT*, nº 207, pp. 57-67, 2018.
- [7] B. de los Ríos de la Peña, *Estudio de formas de onda candidatas para comunicaciones 5G: Generación y análisis de señal GFDM*, Sevilla: Universidad de Sevilla, 2018.
- [8] Rohde & Schwarz, «5G Waveforms Candidates,» Junio 2016. [En línea]. Available: <http://www.rohde-schwarz.com/apnote/1MA271>. [Último acceso: Junio 2019].
- [9] G. Fettweis, M. Krondorf y S. Bittner, «GFDM -Generalized Frequency Division Multiplexing,» de *VTC Spring 2009 -IEEE 69th Vehicular Technology Conference*, Barcelona, España, 2009.
- [10] F. Schaich, T. Wild y Y. Chen, «Waveform Contenders for 5G - Suitability for Short Packet and Low Latency Transmissions,» de *IEEE 79th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, Seoul, South Korea, 2014.
- [11] «UFMC vs. OFDM Modulation», 2014. [En línea]. Available: <https://es.mathworks.com/help/comm/examples/ufmc-vs-ofdm-modulation.html>. [Último acceso: Junio 2019].
- [12] T. Wild, F. Schaich y Y. Chen, «5G air interface design based on Universal Filtered (UF-)OFDM,» de *19th International Conference on Digital Signal Processing*, Hong Kong, China, 2014.
- [13] X. Wang, T. Wild, F. Schaich y A. F. d. Santos, «Universal Filtered Multi-Carrier with Leakage-Based Filter Optimization,» de *20th European Wireless Conference*, Barcelona, 2014.
- [14] X. Wang, T. Wild y F. Schaich, «Filter Optimization for Carrier-Frequency- and Timing-Offset in Universal Filtered Multi-Carrier Systems,» de *IEEE 81st Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, Glasgow, UK, 2015.
- [15] Y. Chen, F. Schaich y T. Wild, «Multiple Access and Waveforms for 5G: IDMA and Universal Filtered Multi-Carrier,» de *IEEE 79th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, Seoul,

- South Korea, 2015.
- [16] Vakilian, V.; Wild, T.; Schaich, F.; ten Brink, S.; Frigon, J.-F.; “Universal Filtered Multi-Carrier Technique for Wireless Systems Beyond LTE,” de *9th Int. Workshop on Broadband Wireless Access at IEEE Globecom '13*, Atlanta, Dec. 2013.
- [17] C. Cox, *An Introduction to LTE: LTE, LTE-Advanced, SAE and 4G Mobile Communications*, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2014.
- [18] R. Vannithamby y S. Talwar, *Towards 5G: applications, requirements & candidate technologies*, John Wiley & Sons Inc., 2017.
- [19] ITU, «IMT traffic estimates for the years 2020 to 2030», 2015.
- [20] Universidad internacional de Valencia, «Evolución de la red de comunicación móvil, del 1G al 5G», 12 Octubre 2016. [En línea]. Available: <https://www.universidadviu.es/evolucion-la-red-comunicacion-movil-del-1g-al-5g/>. [Último acceso: Junio 2019].
- [21] Qualcomm, «Understanding 3GPP - starting with the basics», Agosto 2017. [En línea]. Available: <https://www.qualcomm.com/news/onq/2017/08/02/understanding-3gpp-starting-basics>. [Último acceso: Junio 2019].
- [22] N. Dewangan, *A detailed Study of 4G in Wireless Communication*, Hamburgo: Anchor Academic, 2014.
- [23] A. A. Zaidi, R. Baldemair, M. Andersson, S. Faxér, V. Molés-Cases y Z. Wang, «Designing for the future: the 5G NR physical layer,» *Ericsson Technology Review*, 2017.
- [24] J. Campos, *Understanding the 5G NR Physical Layer*, Keysight Technologies, 2017.
- [25] R. Gerzaguet, D. Kt'enas, N. Cassiau y J.-B. Dor', *Comparative study of 5G waveform candidates for below 6GHz air interface*, cea tech, 2016.
- [26] F. Schaich y T. Wild, «Waveform contenders for 5G — OFDM vs. FBMC vs. UFMC,» de *6th International Symposium on Communications, Control and Signal Processing (ISCCSP)*, Athens, Greece, 2014.