



5G networks for Autonomous Vehicle and Smart Cities

A Degree Thesis

Submitted to the Faculty of the

Escola Tècnica d'Enginyeria de Telecomunicació de Barcelona

Universitat Politècnica de Catalunya

by

Pau Llombart

In partial fulfilment

of the requirements for the degree in

Telecommunications System Engineering

Advisor: Jose Antonio Lazaro

Barcelona, June 2018

Abstract

The objective of the work is to study and analyse the new scenario that is presented to us with the new generation of mobile communications, from the evolution of mobile communications, to the alternatives that exist for 5G.

It will give a vision of the capacities that are expected for the 5G and that new scenarios at the service level are expected to cover, in order to later be able to compare the proposed modulation formats and see which solutions they present in front of the limitations of OFDM.

The proposed modulations are FBMC, UFMC, GFDM and F-OFDM, which will be analysed and contrasted with several simulations with Matlab.

In addition, 3 simulations will be developed in an SDR module with different modulation formats (QPSK, OFDM, F-OFDM) to see how the Adalm-Pluto module responds and what features it offers for future work using 5G signals in a smart vehicle being Adalm-Pluto the communication tool.

Resum

El objectiu del treball és estudiar y analitzar el nou escenari que se'ns presenta amb la nova generació de les comunicacions mòbils, des de la evolució de les comunicacions mòbils, fins a les alternatives que existeixen de cara el 5G.

Es donarà una visió de les capacitats esperades per el 5G i quins nous escenaris a nivell de servei espera cobrir, per posteriorment poder comparar tots els formats de modulació proposats y veure quines solucions presenten en front a les limitacions de OFDM.

Les modulacions proposades son FBMC, UFMC, GFDM y F-OFDM, que seran analitzades i contrastades amb diverses simulacions amb Matlab.

A demés, es desenvoluparan 3 simulacions en un mòdul SDR amb diferents formats de modulació (QPSK, OFDM i F-OFDM) per veure com respon el mòdul Adalm-Pluto i quines prestacions ofereix de cara a un futur treball poder utilitzar senyals 5G en un vehicle intel·ligent sent Adalm-Pluto la eina de comunicació.

Resumen

El objetivo del trabajo es estudiar y analizar el nuevo escenario que se nos presenta con la nueva generación de las Comunicaciones móviles, desde la evolución de las Comunicaciones móviles, hasta las alternativas que existen para el 5G.

Se dará una visión de las capacidades que se esperan para el 5G y que nuevos escenarios a nivel de servicio espera cubrir, para posteriormente poder comparar los formatos de modulación propuestos y ver que soluciones presentan frente a las limitaciones de OFDM.

Las modulaciones propuestas son FBMC, UFMC, GFDM y F-OFDM, que serán analizadas y contrastadas con diversas simulaciones con Matlab.

A demás se desarrollarán 3 simulaciones en un módulo SDR con distintos formatos de modulación (QPSK, OFDM, F-OFDM) para ver cómo responde el módulo Adalm-Pluto y que prestaciones ofrece para un futuro trabajo utilizar señales 5G en un vehículo inteligente siendo Adalm-pluto la herramienta de comunicación.

Reconocimientos

En primer lugar, quiero agradecer a Jose Lázaro el apoyo y la positividad que me ha transmitido a través de las reuniones y correos que hemos compartido durante este periodo. Es un motivador nato y esto me ayudado a tirar hacia delante ya que debido a la gran cantidad de contratiempos que han surgido con el dispositivo Adalm-Pluto llegué a replantearme el proyecto.

También quiero agradecer el apoyo recibido por parte de mi familia durante todos estos años de carrera. Siempre me han animado y motivado a seguir adelante para lograr mis objetivos.

Finalmente quiero agradecer a todo el profesorado de la UPC con quien he compartido estos años de aprendizaje, su voluntad de transmitirme sus conocimientos y que, gracias a estos conocimientos, he conseguido entrar en la empresa de automoción SEAT, que fue mi objetivo desde antes de iniciar los estudios universitarios.

Historial de revisiones y registro de aprobación

Revision	Date	Purpose
0	20/04/2018	Document creation
1	dd/mm/yyyy	Document revisió

DOCUMENT DISTRIBUTION LIST

Name	e-mail
Pau Llombart Simon	Pausimon93@gmail.com
Jose Antonio Lazaro	Jose.lazaro@tsc.upc.edu
Adolfo Lerin	Adolfo.lerin@altra.com

Written by: Pau Llombart Simon		Reviewed and approved by:	
Date	20/04/2018	Date	dd/mm/yyyy
Name	Pau Llombart	Name	Jose Antonio Lazaro
Position	Project Author	Position	Project Supervisor

Tabla de contenidos

Abstract	1
Resum.....	2
Resumen.....	3
Reconocimientos.....	4
Historial de revisiones y registro de aprobación.....	5
Tabla de contenidos	6
Lista de figuras.....	8
Lista de tablas:.....	10
1. Introducción	11
1.1. Requerimientos y especificaciones	11
1.2. Plan de trabajo y diagrama de Gantt	12
2. Estado del arte de las comunicaciones móviles:.....	13
2.1. Evolucion de las comunicaciones móviles.....	13
2.2. Nuevo escenario 5G	15
2.2.1 Limitaciones 4G.....	16
2.2.2 Requisitos 5G.....	17
3. Análisis de las modulaciones 5G:	17
3.1 FBMC.....	18
3.2 UFMC.....	22
3.3 GFDM.....	24
3.4 F-OFDM.....	26
4. Simulaciones sobre Adalm-Pluto.....	29
4.1 Sistema QPSK.....	29
4.1.1 Estructura.....	29
4.1.2 Resultados.....	31



4.1.3 Modificaciones y posibles mejoras.....	31
4.2 Sistema OFDM.....	32
4.2.1 Estructura.....	33
4.2.2 Resultados.....	34
4.2.3 Modificaciones y posibles mejoras.....	38
4.3 Sistema F-OFDM.....	38
4.3.1 Resultados.....	39
4.3.2 Posibles mejoras.....	40
5. Presupuesto.....	41
6. Conclusiones y futuro desarrollo	42
Bibliography:	44
Glossary	46

Lista de figuras:

- 1.1.a SDR Adalm-Pluto
- 1.2.a Diagrama de Gantt
- 2.1.a Generaciones de Comunicaciones móviles y estándares
- 2.1.b Aparición de nuevos servicios
- 2.2.a Pilares fundamentales de las Smart cities
- 2.2.2.a Requerimientos 5G
- 3.1.a Esquema transmisor y receptor FBMC
- 3.1.b PSD FBMC con factor de overlapping $k=4$ por Matlab
- 3.1.c PSD OFDM por Matlab
- 3.1.d Forma de onda FBMC en función del factor de overlapping
- 3.1.e Comparativa forma de onda OFDM vs FBMC
- 3.2.a Esquema transmisor y receptor UFMC
- 3.2.b PSD UFMC con 200 sub-portadoras por Matlab
- 3.2.c PSD OFDM con 200 sub-portadoras por Matlab
- 3.3.a Transmisor GFDM detallado
- 3.3.b Esquema transmisor y receptor GFDM
- 3.3.c PSD GFDM vs OFDM
- 3.4.a Flexibilidad de las formas de onda F-OFDM para la ubicación de servicios
- 3.4.b Flexibilidad sub-bandas F-OFDM
- 3.4.c Esquema transmisor F-OFDM
- 3.4.d Esquema receptor F-OFDM
- 3.4.e Distintos enventanados de la respuesta frecuencial del filtro en F-OFDM
- 3.4.f PSD F-OFDM con 600 sub-portadoras
- 3.4.g PSD OFDM con 600 sub-portadoras
- 4.1.1.a Parametrización transmisión QPSK

- 4.1.2.a Resultados simulación QPSK en Adalm-Pluto
- 4.1.2.b Resultados simulación QPSK en Adalm-Pluto con 65 dB de atenuación
- 4.1.3.a Errores de sincronización en simulación QPSK
- 4.2.2.a Corrección del offset y detección de celda en la transmisión OFDM-LTE
- 4.2.2.b Resultados transmisión imagen con OFDM-LTE
- 4.2.2.c PSD de la señal OFDM recibida
- 4.2.2.d Estimación de la respuesta frecuencial del canal
- 4.2.2.e Constelación de los símbolos PDSCH ecualizados recibidos
- 4.2.2.f Comparativa de los resultados de la simulación OFDM-LTE
- 4.3.1.a Espectro de la señal F-OFDM simulada a nivel software
- 4.3.1.b Constelación de los símbolos F-OFDM demodulados
- 6. a Comparativa PSD OFDM, FBMC, UPMC, GFDM y F-OFDM



Lista de tablas:

3.1.a Resultados de los coeficientes del filtro según el factor de overlapping por Matlab

5.a Presupuesto

1. Introducción

Las comunicaciones móviles juegan un papel muy importante en todos los ámbitos de nuestra sociedad, estando presentes en el día a día en nuestras tareas cotidianas. Se trata de una tecnología tan integrada que en 2017 el número de líneas móviles ha superado por primera vez a la población mundial representando el número de SIMS el 103% de la población.

El éxito de las comunicaciones móviles se basa en que se trata de una tecnología que desde su origen está en permanente evolución siendo capaz generación tras generación, sobrepasar las prestaciones en términos de velocidad de datos, capacidad de usuarios y de tráfico, aparte de ofrecer en cada una de las generaciones nuevos servicios respecto a su predecesora.

En este trabajo se pretende dar una visión de la evolución y los cambios que han presentado las diferentes generaciones y analizar el nuevo escenario 5G. Posteriormente, se estudiarán las modulaciones candidatas a remplazar OFDM en el 5G.

Paralelamente se desarrollarán 3 simulaciones de distintos formatos de modulación para entender y demostrar cómo funciona y que prestaciones ofrece el SDR Adalm-Pluto. Se han elegido las modulaciones QPSK para conocer el comportamiento de Adalm-Pluto, OFDM según el estándar LTE para demostrar con un caso práctico las prestaciones del SDR y del 4G, y finalmente la modulación F-OFDM para ver a nivel práctico los resultados que ofrece una de las modulaciones candidatas para el 5G.

1.1. Requerimientos y especificaciones

- Análisis del nuevo escenario 5G y sus requerimientos
- Estudio de las modulaciones candidatas para el 5G. Análisis de las características y ventajas que ofrecen cada una de las modulaciones estudiadas respecto su predecesor, para conocer cual o cuales y en qué circunstancias pueden proporcionar mejores prestaciones.
- Desarrollo de 3 simulaciones sobre el módulo SDR Adalm-Pluto con el software Matlab:
 - Implementación de sistema de comunicación QPSK
 - Implementación de sistema de comunicación OFDM según el estándar LTE(4G).
 - Implementación de sistema de comunicación F-OFDM(5G)

Herramientas necesarias:

- Software Matlab & Simulink. En el inicio del proyecto se pretendía que todo el desarrollo de simulaciones se realizara en el entorno Simulink, pero debido a los problemas de

compatibilidad entre Adalm-Pluto y Simulink que nunca se consiguieron solucionar, se optó por realizar el desarrollo de las simulaciones mediante Matlab.

- SDR Adalm-Pluto: es un dispositivo SDR que incorpora el módulo transceptor AD9363 de Analog Devices y la FPGA Xilinx Zynq Z-7010. Las prestaciones más destacadas que ofrece son las siguientes:
 - o Rango de frecuencia central: 325 MHz a 3.8 GHz. (con el paquete de soporte de Mathworks se amplía de 70 MHz a 6GHz). [27]
 - o Ancho de banda hasta 20MHz
 - o Interfaz USB
 - o Soporte Matlab y Simulink
 - o Transmisor y receptor half y full dúplex.

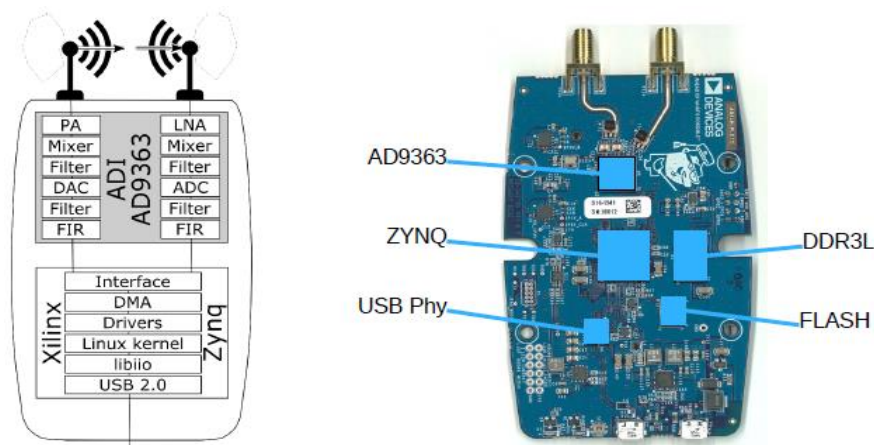


Figura 1.1.a SDR Adalm-Pluto [26]

1.2. Plan de trabajo y diagrama de Gantt

El plan de trabajo se ha realizado de la siguiente manera:

- Primera fase: Investigación acerca de la evolución de las comunicaciones móviles con el desarrollo paralelo de un sistema de comunicación basado en QPSK
- Segunda fase: Análisis del nuevo escenario 5G y sus requerimientos con el la implementación paralela de un sistema de comunicaciones OFDM-LTE.
- Tercera fase: Estudio de 4 de las modulaciones candidatas para el 5G. Se analizan sus características más importantes como PSD, filtrado y estructura del transceptor requerido por el sistema entre otros.
- Cuarta fase: Según el WP4 definido en critical review en esta fase se desarrolla un sistema de comunicación 5G sobre Adalm-Pluto. Debido a los constantes contratiempos relacionados primero con la compatibilidad entre el firmware de Adalm-pluto y Matlab, y

la posterior problemática relacionada con la gestión de Matlab de los recursos USB, el tiempo destinado a este WP4 se ha reducido notablemente. Además, en el desarrollo del sistema F-OFDM no se consiguió que Matlab cargara los métodos de transmisión repetitiva en bucle que fueron gran parte de la solución a los problemas anteriores. Por este motivo solo se ha podido realizar una simulación a nivel software de un transmisor F-OFDM.

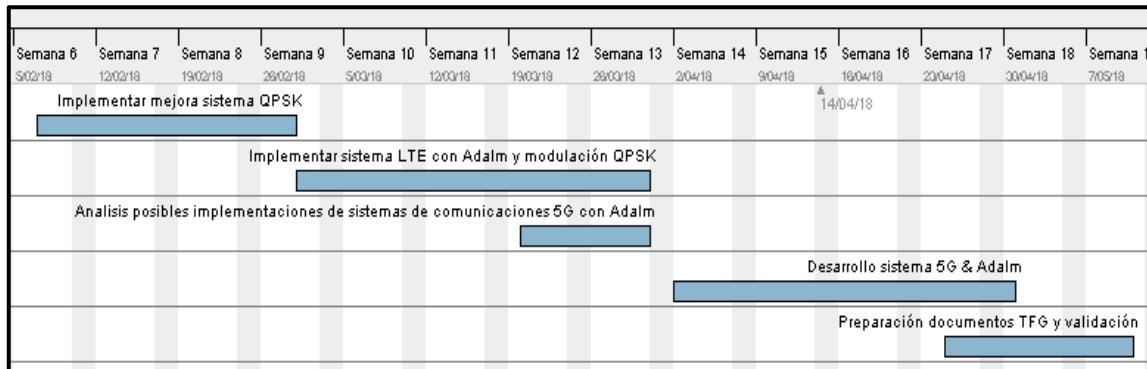


Figura 1.2.2a Diagrama de Gantt

2. Estado del arte de las comunicaciones móviles:

A continuación, se ilustrará como han ido evolucionando las tecnologías en las comunicaciones móviles hasta llegar al 5G, para así poder interpretar las necesidades y características que ofrecerá la nueva generación de comunicaciones móviles.

2.1. Evolución de las Comunicaciones móviles

Desde la primera red de comunicación móvil lanzada por NTT en Japón en 1979, el área de las comunicaciones móviles ha estado en continua evolución con cambios significativos cada 10 años.

En la primera generación (1G) el único servicio que incorporaba dicho sistema era el servicio de voz con una velocidad de 1-2,4Kbps en el rango 800-900MHz. Las comunicaciones de voz por aquel entonces eran de baja calidad y no contemplaban grandes protocolos de seguridad.

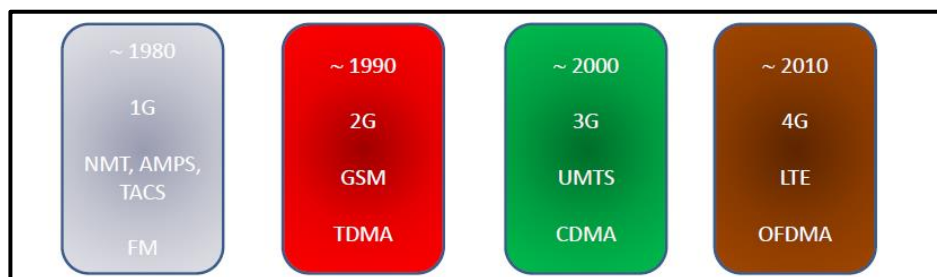


Figura 2.1.a Generaciones de comunicaciones móviles y estándares [25]

La segunda generación fue un gran salto cualitativo tanto en servicio como en prestaciones. La tecnología GSM (Global System for Mobile communications) permitió unir los servicios de voz, datos digitales e incluir el SMS entre otros servicios. Además, la estandarización única en GSM generó la aparición del roaming internacional.

Las prestaciones que ofrecía eran mayores que las de su predecesor, velocidad de 14 a 64 Kbps y la banda de operación 850-1900MHz según la región geográfica. El ancho de banda utilizado por GSM es de 200KHz [1] dividido en bloques de 25kHz.

El tipo de comunicación utilizada en la 2G sigue siendo la conmutación de circuito por lo que seguía teniendo una pobre eficiencia en términos de recursos. No fue así durante todo el periodo de auge del 2G, ya que se desarrollaron los estándares GPRS y EDGE en los que las velocidades de datos se vieron mejoradas significativamente a 115 Kbps y 384KBps respectivamente y ambos utilizan la conmutación de paquetes. Además, se incorporaron nuevos servicios como WAP y MMS.

El desarrollo de la siguiente generación, el 3G siguió con el objetivo de ofrecer una mayor tasa de datos, y soportar un abanico de aplicaciones mayor que su predecesor. Los datos seguían la técnica de comunicación de conmutación de paquetes, pero las llamadas de voz seguían la conmutación de circuitos.

El estándar empleado es UMTS y la técnica de acceso CDMA, con ellos se lograron unas tasas de datos de 384 KBps a 2Mbps y requería de un ancho de banda de 5 a 20MHz. (bandas de frecuencia utilizadas en España 900 y 2100 MHz).

El 3G también tuvo un nuevo estándar en medio de su desarrollo al igual que sucedió con GSM y GPRS. En el caso 3G aparecieron 2 nuevos estándares, HSPA que ofrecía unas velocidades de 14,4Mb/s de bajada y 5,76Mb/s de subida, que posteriormente evolucionó en HSPA+ con velocidades de pico de 168 Mb/s de bajada y 22Mb/s de subida.

Gracias a este aumento de prestaciones se logró ofrecer nuevos servicios como acceso a internet de alta velocidad, llamadas de video o banca virtual entre otros.

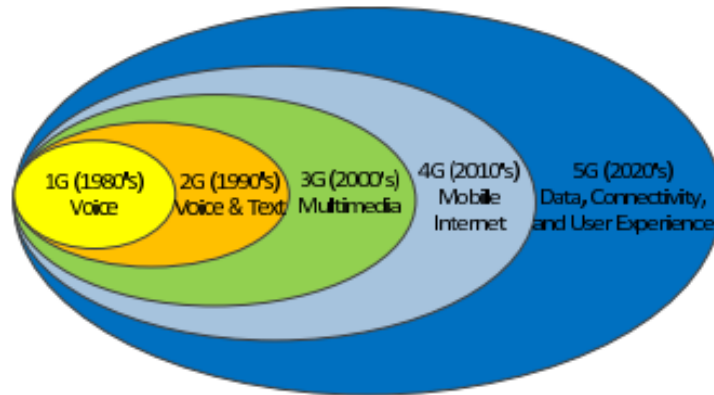


Figura 2.1.b Aparición de nuevos servicios

La cuarta generación (4G) y que sigue siendo la última estandarizada hasta el día de hoy, se basa en el estándar LTE (Long-Term Evolution) en modo FDD (Frequency Division Duplex) generalmente.

Las prestaciones en cuanto a velocidad varían desde los 100Mbps a 1Gbps, mantiene la misma canalización de ancho de banda que el 3G e incorpora técnicas de multiplexación/acceso como OFDM, MC-CDMA o CDMA. Las bandas de operación de LTE en Europa son 800,1800 y 2600 MHz.

Entre la nueva gama de servicios que presenta, destacan el acceso móvil web, telefonía IP, videoconferencia y computación en la nube.

2.2. Nuevo escenario 5G

El futuro de las tecnologías móviles pasa por la revolución de los usos y aplicaciones, pero para ello es necesaria una revolución tecnológica ya en marcha, que multiplique la velocidad de transmisión hasta cotas inimaginables hace solo una década. En el 2020, el 5G será una realidad para los usuarios de teléfonos móviles.

Se espera que la tecnología 5G sea uno de los desarrollos tecnológicos más importantes de nuestro tiempo. Conectará billones de "elementos" que no han sido conectadas antes, sumando inteligencia artificial y datos en automóviles, hogares, edificios, fábricas, ciudades e infraestructuras. Esta conexión de varios elementos generará la aparición de las Smart cities.

El concepto de "smart city" se articula sobre la base de cuatro ideas esenciales:

- Las cuestiones ambientales y las restricciones energéticas.
- La comunicación fluida de los actores entre sí: colectividades, ciudadanos, empresas, instituciones.

- El uso compartido de bienes y servicios, con una activa participación de los usuarios en la concepción de productos, servicios, y modalidades operativas, y renunciando en algunos casos a la propiedad y uso individual.
- La integración de las nuevas tecnologías de la información y de la comunicación, la robótica y los sistemas inteligentes de transporte, que potencian el funcionamiento en red, la modificación de la matriz energética a favor de las energías renovables, y el cambio de comportamiento y usos por parte de los ciudadanos.

En definitiva, una Smart city es una ciudad cuyo desarrollo urbano se basa en la sostenibilidad, respondiendo a las necesidades ambientales, sociales y económicas de los habitantes, empresas e instituciones.



Figura 2.2.a Pilares fundamentales de las Smart cities

En esta nueva red de “billones de elementos conectados” aparecerá un nuevo concepto, los vehículos inteligentes, que causará una revolución en el sector automovilístico.

Los vehículos inteligentes tiene como objetivo las comunicaciones M2M, para poder transmitir información del entorno en tiempo real, ya que deberán tomar decisiones inmediatas dependiendo de los datos del entorno que adquieran a través de sus sensores, de otros vehículos y de otros elementos que existan en las smart cities.

2.2.1 Limitaciones 4G

Es evidente que se necesita una nueva tecnología capaz de dar solución a estos nuevos servicios, ahora bien, ¿por qué 4G no puede ser capaz de dar solución? La razón por la que no puede dar solución reside en el formato de modulación utilizado, OFDM. La forma de onda OFDM presenta una serie de limitaciones que se comentan a continuación [3]:

- Se necesita una banda de protección del 10% para cumplir con el requisito de rechazo de fugas fuera de banda.
- La forma de onda OFDM no es flexible.
- La forma de onda OFDM no puede admitir la operación asincrónica.
- Se necesita ajuste de tiempo

2.2.2 Requisitos del 5G

El desarrollo del 5G es necesario debido a las perspectivas de servicios y aplicaciones que se esperan, y que con 4G LTE difícilmente se podrían lograr. Las capacidades que se esperan para el 5G y que con la actual generación no se puede cubrir son las siguientes: [2]

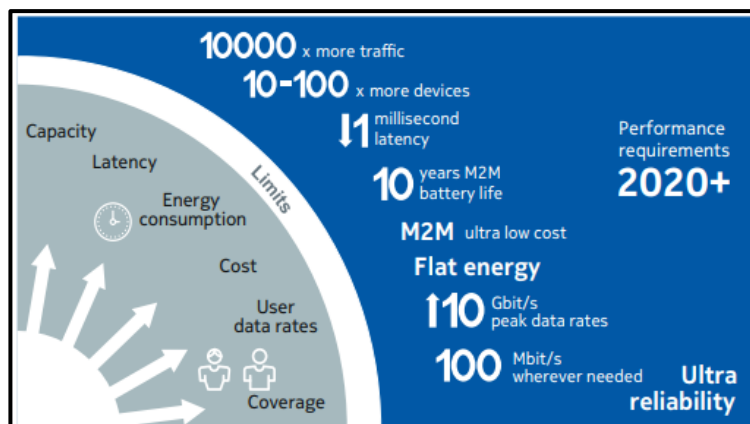


Figura 2.2.2.a Requerimientos 5G

- Capacidad: Incremento en un factor 10 a 100 de los dispositivos conectados
- Latencia: Se pretende reducir la latencia a 1ms. Se decidió 1 ms debido a que no es perceptible por el usuario. A este fenómeno le llama desaparición virtual de la latencia.
- Consumo Energético: se espera que en las comunicaciones M2M la vida de las baterías alcance los 10 años.
- Prestaciones en tasa de datos: Se esperan unas tasas de datos que alcanzarán picos de 10Gbit/s y los 100 Mbits/s donde sea necesario.

3. Análisis de las modulaciones 5G:

Una vez comprobada la necesidad de una nueva generación y las limitaciones de la generación actual, se va a analizar en este apartado las características y las prestaciones que ofrecen 4 de las varias propuestas para el 5G que existen actualmente.

Cabe resaltar que el diseño de los formatos de modulación no es la única técnica que se está desarrollando, el desarrollo de la arquitectura MIMO está presente en la implementación del 5G, de hecho, Intel está desarrollando el MMIMO (Masive Multiple Input Multiple Output) con 64 antenas para lograr decodificar mejor múltiples flujos de datos simultáneos [15]. En este trabajo, pero, se va a focalizar en el diseño de las modulaciones basadas en el filtrado de sub-banda (UFMC y F-OFDM) y las basadas en la conformación de pulso (FBMC y GFDM). En cada una de ellas se comentará el esquema transceptor, la PSD, filtrado y las principales características que las diferencian entre ellas, para poder así sacar una conclusión sobre cuál es la que mejor puede responder a las exigencias previstas para el 5G.

Acerca de OFDM, ¿de dónde partimos?

OFDM fue una gran elección para el 4G ya que proporciona una buena eficiencia espectral, puede procesarse de manera óptima con las capacidades de los teléfonos móviles actuales y funciona bien con flujos de datos de alta velocidad ocupando amplios anchos de banda. También responde adecuadamente en situaciones donde hay un desvanecimiento selectivo.

Algunos de los nuevos formatos parten como una evolución de OFDM y otros parten de solventar los inconvenientes que presenta OFDM en LTE como por ejemplo la inserción de un prefijo cíclico que ocupa espacio de la secuencia de datos.

Debido a la perspectiva de las nuevas aplicaciones tales como descarga de video de alta calidad, comunicaciones vehículo a vehículo, vehículo a infraestructura de comunicaciones, IOT/M2M... los requisitos de los esquemas de modulación se ven aumentados respecto a su predecesor.

Las propuestas para el 5G se centran en mejorar la eficiencia espectral, la flexibilidad y la reducción de la interferencia entre sub portadoras.

3.1. FBMC (*Filter Bank Multi-Carrier*)

Tiene algunas similitudes con CP-OFDM, aunque no incorpora el prefijo cíclico para mejorar así la eficiencia espectral. Su funcionamiento es el siguiente, en lugar de filtrar toda la banda como en OFDM y modular cada dato de entrada en una subportadora, FBMC filtra cada subportadora individualmente y modula cada dato de entrada en $2 \cdot K-1$ subportadoras [8]. Los filtros de las subportadoras son de un ancho de banda muy estrecho y requieren constantes de tiempo de filtro muy largas. Generalmente la constante de tiempo es 4 veces la longitud básica del símbolo, como resultado los símbolos individuales se superponen en el tiempo [7]. El requisito principal

del filtro es atenuar los lóbulos secundarios para reducir las interferencias entre subportadoras y reducir la radiación fuera de banda.

A continuación, se observa el esquema de un sistema FBMC. Este esquema emplea la modulación OQAM que es una de las 2 variantes de FBMC que existen. Se utiliza la técnica del banco de filtros polifásicos (PFB) para conseguir una respuesta plana en todo el canal y conseguir una excelente supresión de señales fuera de banda [6]. Otro dato a tener en cuenta en la implementación de un sistema FBMC es el tamaño de la DFT que debe extenderse de N muestras a $K \cdot N$ de modo que la longitud del filtro $L = K \cdot N - 1$ [8].

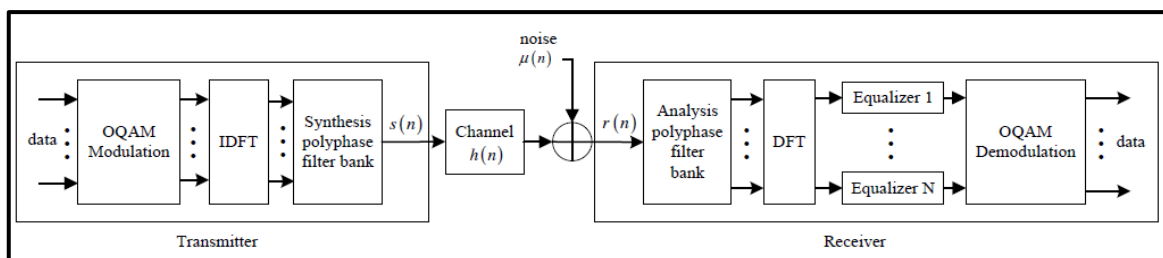


Figura 3.1.a Esquema transmisor y receptor FBMC[5]

Existen 2 variantes de FBMC:

- Basada en señalización compleja (QAM) también denominada como tono múltiple filtrado(FMT). Esta técnica se utiliza actualmente en estándares como el Servicio de Distribución de equipos de Telecomunicaciones (TEDS), y logra la ortogonalidad entre las diferentes subportadoras reduciendo físicamente la superposición en dominio frecuencial.
- Basada en símbolos QAM compensados (Offset QAM). Con OQAM se asegura la ortogonalidad en el dominio real para maximizar la eficiencia espectral y alcanzar la energía de símbolo máxima. Con estos resultados esta variante de FBMC se considera la modulación FBMC de referencia

A continuación, se pueden observar la comparativas entre FBMC y su predecesor OFDM. En estas figuras se comparan las PSD para determinar la radiación fuera de banda. Como se puede ver, la radiación fuera de banda que presenta FBMC (-150 dB) es mucho menor que en OFDM (-40 dB) de modo que la interferencia entre bandas es mucho menor en FBMC que en OFDM.

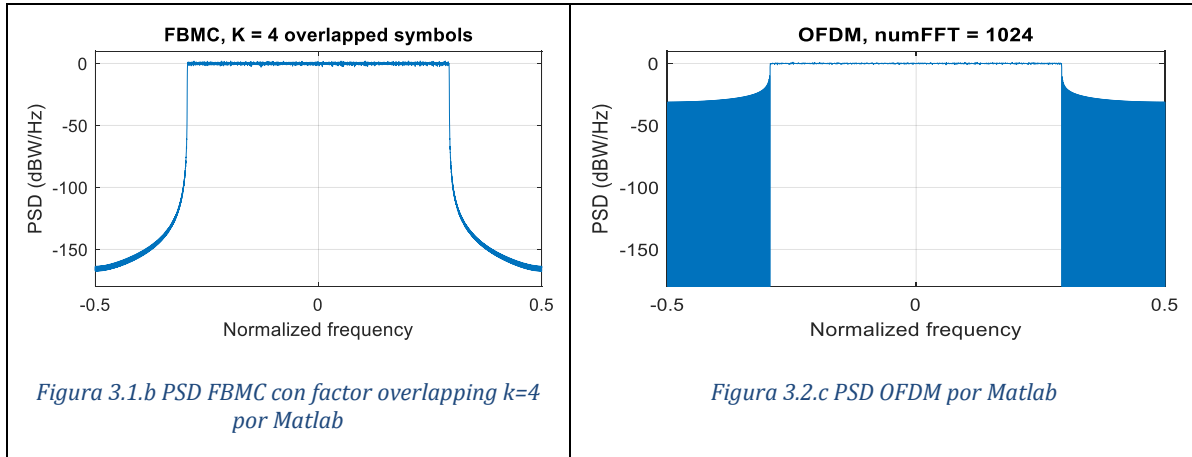


Figura 3.1.b PSD FBMC con factor overlapping k=4 por Matlab

Figura 3.2.c PSD OFDM por Matlab

Al reducirse la radiación fuera de banda en FBMC, presenta una mayor utilización del espectro asignado que se traduce en mayor eficiencia espectral [4].

La diferencia de los resultados que presenta FBMC frente OFDM parten de las diferencias en el proceso del filtrado, mientras en OFDM hay un filtrado total de toda la banda, en FBMC se filtra cada subportadora individualmente en el banco de filtros, pero la clave reside en el diseño del filtro. Uno de los parámetros clave en el diseño del filtro es el factor de overlapping que representa la ratio entre la duración de la respuesta del filtro y el periodo de símbolo multiportadora.

Cabe resaltar que la forma de onda FBMC puede variar el ancho de banda y la atenuación en lóbulos secundarios según el factor de overlapping, cuando mayor es el factor de overlapping, mayor es el ancho de banda del lóbulo principal y mayor es la atenuación que sufren los lóbulos secundarios. Debido a que en FBMC se realiza un filtrado por cada subportadora, este filtrado es de un ancho de banda muy pequeño por lo que es esencial encontrar la relación óptima entre ancho de banda del lóbulo principal y atenuación de los secundarios. En definitiva, hay que ajustar el factor de overlapping para llegar al compromiso de ancho de banda filtrado e interferencia entre subportadoras

Para entender como el factor de overlapping 'K' afecta a la constitución del filtro, partimos de la expresión matemática de la respuesta frecuencial de un filtro FIR [8].

$$H(f) = \sum_{k=-(K-1)}^{K-1} H_k \cdot \frac{\sin(\pi(f - \frac{k}{N \cdot K}) \cdot N \cdot K)}{N \cdot K \cdot \sin(\pi(f - \frac{k}{N \cdot K}))}$$

Con Hk coeficientes del filtro FBMC, N subportadoras y K factor de overlapping.

Valores calculados con la simulación Matlab de las PSD mostradas anteriormente.

K	H	H1	H2	H3	σ_2 (dB)
2	1	0.707106	-	-	-35
3	1	0.911438	0.411428	-	-44
4	1	0.971960	0.707106	0.235147	-65

Tabla 3.1.a Resultados de los coeficientes del filtro según el factor de overlapping por Matlab

El factor de overlapping con K=4 es el valor más adecuado [9]. En la siguiente figura se puede observar que el factor de overlapping 4, proporciona la mejor atenuación de lóbulos secundarios, reduciendo así interferencia entre subportadoras adyacentes.

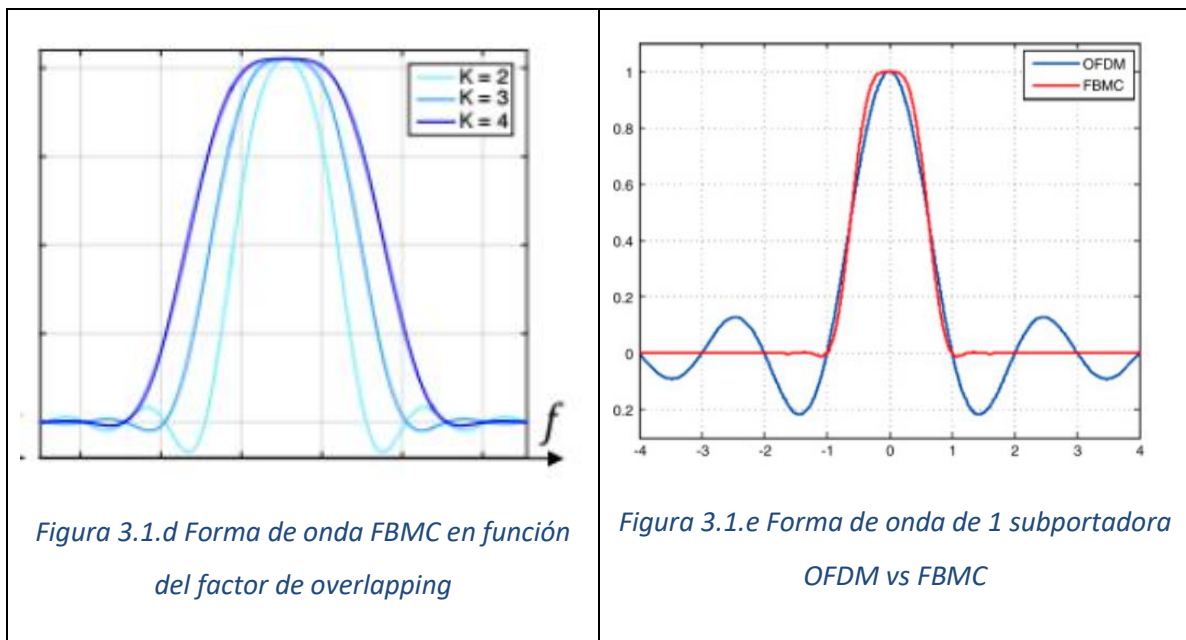


Figura 3.1.d Forma de onda FBMC en función del factor de overlapping

Figura 3.1.e Forma de onda de 1 subportadora OFDM vs FBMC

Resumen de las ventajas de la modulación FBMC:

- Puede alcanzar una interferencia entre símbolos y una interferencia entre portadoras menor que OFDM
- Sin necesidad de utilizar el prefijo cíclico (CP) y, en su lugar, emplear una forma de pulso bien diseñada, que satisface las condiciones de reconstrucción.
- Los filtros de síntesis y análisis de las subportadoras en OFDM tienen lóbulos laterales relativamente grandes debido a la forma de pulso rectangular de las subportadoras, ocasionando filtraciones de potencia hacia las bandas de otros usuarios, que causan interferencias indeseables
- En OFDM es necesario extender la duración del símbolo por un tiempo de guarda que exceda la duración de la respuesta al impulso; si bien de esta forma se soluciona el problema de interferencias entre bandas, se reduce el desempeño del sistema por tener que utilizar más ancho de banda.

3.2. UFMC (Universal Filtered Multicarrier)

UFMC es considerada una mejora de CP-OFDM. Se trata de una modulación basada en el filtrado de sub banda, es decir, en vez de filtrar cada subportadora como en FBMC, UFMC divide la señal en varias sub-bandas y luego las filtra para posteriormente reagruparlas y enviar los datos [7]. Tampoco utiliza prefijo cíclico, pero puede ser implementado para mejorar la protección a interferencias entre símbolos.

UFMC consta de N subportadoras en una banda B dividida en sub bandas. A cada sub banda se asigna una parte de las N subportadoras manteniendo siempre el mismo ancho de banda. Después del mapeado de subportadoras se realiza una IDFT de N puntos para cada una de las sub bandas y se insertan ceros en las subportadoras que no estén asignadas para la transmisión. A continuación, se realiza un filtrado a cada sub banda y se suman todas las respuestas de la salida de los filtros. Cada filtro es una versión desplazada del mismo filtro prototipo [5]. Este filtrado tiene como objetivo reducir la radiación fuera de banda. Así pues, a diferencia del filtrado de banda (OFDM) o filtrado de cada subportadora (FBMC), UFMC realiza un filtrado por grupo de subportadoras.

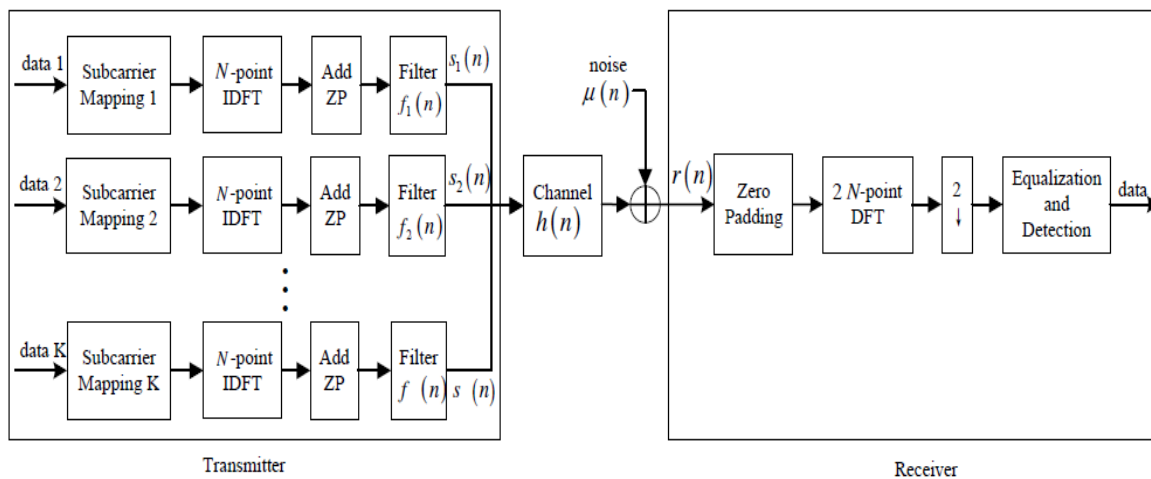


Figura 3.2.a Esquema transmisor y receptor UFMC[5]

Gracias a la agrupación de sub portadoras es posible reducir la longitud del filtro en el dominio temporal en comparación al caso anterior (FBMC). Este fenómeno permite que la interferencia causada por la cola del filtro pueda eliminarse fácilmente [5]. Uno de los tipos de ventana más empleados en UMFC es la ventana de Chebyshev con atenuación de lóbulos laterales.

En el caso de tener un filtro de longitud 1 y manteniendo N sub portadoras, UFMC equivale a OFDM sin prefijo cíclico.

A continuación, se muestran las PSD de UFMC y OFDM simuladas con Matlab. Efectivamente se puede constatar que la radiación fuera de banda que presenta UFMC es mucho menor.

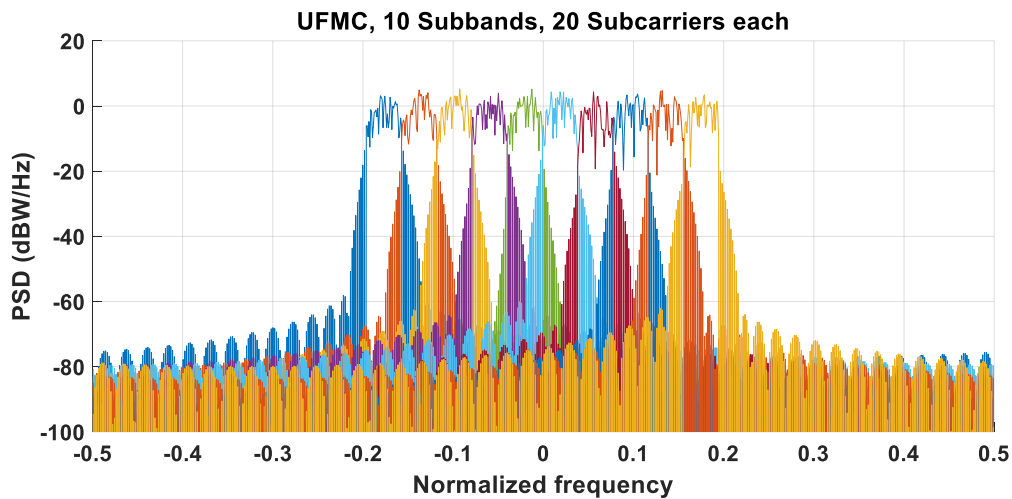


Figura 3.2.b PSD UFMC con 200 sub-portadoras por Matlab

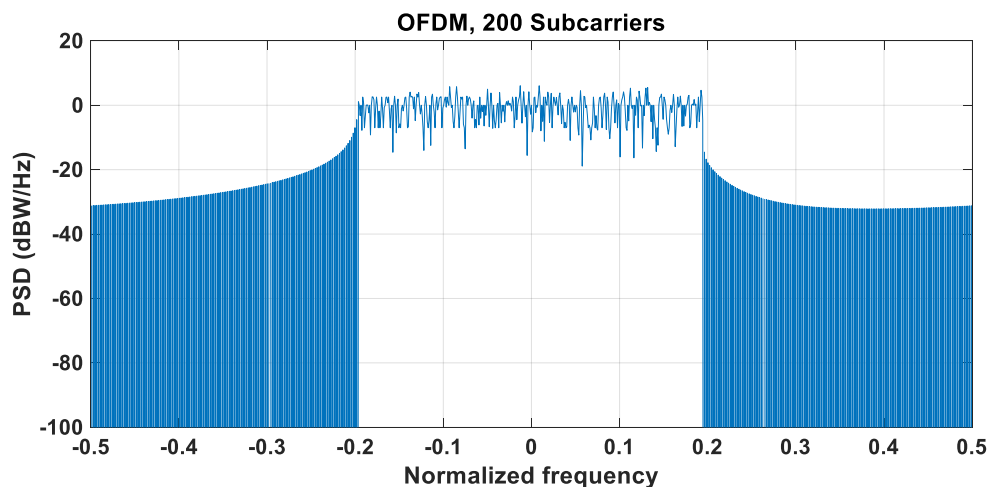


Figura 3.2.c PSD OFDM con 200 sub-portadoras por Matlab

Peak-to-Average-Power-Ratio (PAPR) for OFDM = 8.8843 dB

Peak-to-Average-Power-Ratio (PAPR) for UFMC = 8.2379 dB

UFMC presenta lóbulos laterales inferiores a OFDM de modo que permite una mayor utilización del espectro disponible. Así pues, UFMC tiene una mayor eficiencia espectral y una PAPR ligeramente mejor que reduce el consumo de dicho sistema frente OFDM.

Ventajas de UFMC:

- Mayor eficiencia espectral que OFDM
- Filtrado de sub bandas reduce el tiempo de guarda necesario entre sub bandas y reduce la longitud del filtro (mejor esquema para ráfagas cortas)

- UFMC se centra en el paradigma del Intervalo de tiempo de transmisión (TTI), lo que permite transmisiones de Duplexión por División de Tiempo (TDD) al proporcionar baja latencia [14].
- Consumo energético ligeramente menor.

3.3. GFDM (Generalised Frequency Division Multiplexing)

GFDM es una técnica de modulación multiportadora basada en la conformación de pulso que comparte muchas similitudes con OFDM. De hecho, OFDM y SC-FDM (single Carrier frequency division multiplexing) se considera un caso particular de GFDM.

GFDM proporciona un mejor control de las emisiones fuera de banda y reduce la ratio entre la potencia de pico y la media. La inserción del prefijo cíclico se usa para permitir la ecualización compleja en el lado del receptor. La principal característica es que las portadoras no son ortogonales entre sí [5] y hace uso de filtros circulares. El desplazamiento circular de los filtros tiene el objetivo de realizar una convolución circular eficiente con técnica “tail biting” y reducir así la longitud del CP para mejorar la eficacia espectral. [17]. Esta técnica también reduce las interferencias entre portadoras adyacentes.

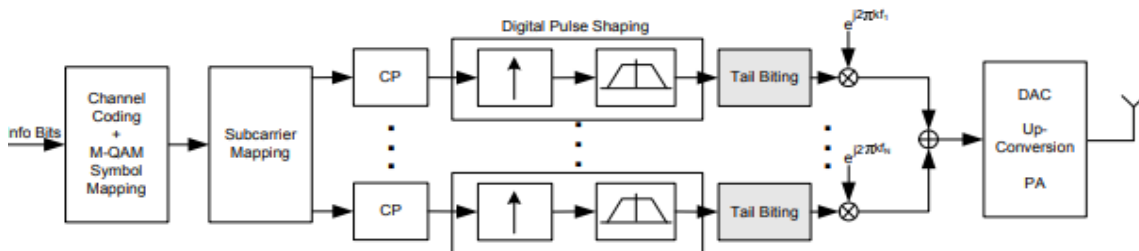


Figura 3.3.a Transmisor GFDM detallado [17]

La forma de onda de GFDM se basa en el filtrado de tiempo-frecuencia de un bloque de datos. El bloque de datos es compuesto por K operadores y M ranuras de tiempo (slots). Como resultado transmite N datos modulados complejos, siendo $N=K \cdot M$ [16]. Se define una nueva estructura de bloque, agrupando varios símbolos en sub-símbolos. A continuación, se muestra el esquema completo de un transmisor y receptor GFDM, que resulta prácticamente idéntico al de OFDM.

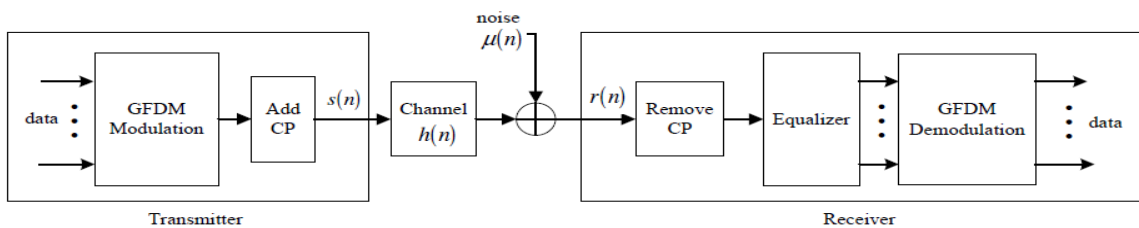


Figura 3.3.b Esquema transmisor y receptor GFDM[5]

Cada subportadora se modula individualmente, usando alguna forma de señalización QAM. Filtro utilizado es un RRC (Root Raise Cosine), diseñado cada uno a la frecuencia óptima para ser aplicado a cada subsímbolo y lograr la reducción del CP. [17]

La señal transmitida para cada bloque GFDM viene expresada como:

$$s(n) = \sum_{k=0}^{K-1} \sum_{m=0}^{M-1} d_{k,m} \cdot g_{k,m}(n) \quad [3]$$

Donde $d_{k,m}$ es el símbolo transmitido en la subportadora K en el subsímbolo M y $g_{k,m}(n)$ es la versión circular de tiempo y frecuencia modificada del filtro prototipo de conformación de pulso para $0 \leq n \leq KM-1$.

Tanto GFDM como FBMC y otras modulaciones propuestas para el 5G basadas en la conformación del pulso, tratan de restringir las señales de transmisión dentro de un ancho de banda estrecho para así mitigar la radiación fuera de banda con una banda de guarda estrecha [5].

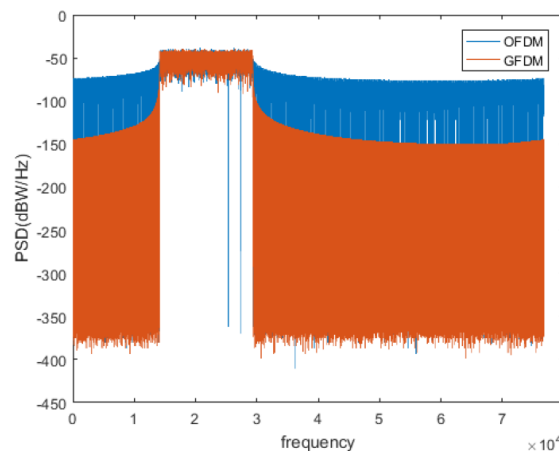


Figura 3.4 PSD GFDM vs OFDM [18]

Ventajas:

- Permite ajustar mejor PAPR reduciendo así el consumo energético.
- La radiación fuera de banda asignada es menor que en OFDM reduciendo así la interferencia entre bandas. La flexibilidad del sistema permite ajustar esta radiación fuera de banda.
- Cada subportadora individual se puede modular individualmente, lo que proporciona un alto grado de flexibilidad en el diseño del sistema y permite una programación multiusuario eficiente. [17]
- La reducción de la ICI gracias al "tail biting", aumenta la solidez en términos de sincronización y destaca como una modulación óptima para sistemas MIMO [5].

3.4. F-OFDM (Filtered Orthogonal Frequency Division Multiplexing):

F-OFDM es una modulación basada en el filtrado de sub banda que nace como una evolución de CP-OFDM que tuvo una gran acogida para una gran variedad de sistemas como LTE y Wifi entre otros, debido a las ventajas que ofrece como una alta eficiencia, fácil implementación y fácil de integrar en sistemas MIMO. Aun así, presenta una serie de debilidades como la radiación de potencia fuera de banda, un requerimiento riguroso de sincronización y la poca flexibilidad ya que la banda total solo puede configurarse con los mismos parámetros de forma de onda (espaciado de portadoras, longitud CP, TTI...).

El funcionamiento de F-OFDM es el siguiente, divide el ancho de banda total en varia sub bandas y posteriormente son filtradas independientemente, se puede decir que aplica un filtrado en sub bandas al tradicional CP-OFDM. Los diferentes tipos de servicios se ubican en las diferentes sub-bandas con la forma de onda y numerología adecuadas. [13] Proporciona una utilización del espectro mucho más eficiente para la variedad de servicios que se ofrecerán.

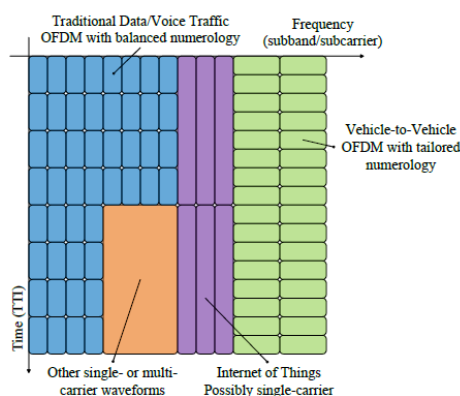


Figura 3.4.a Flexibilidad de las formas de onda F-OFDM para la ubicación de servicios [13]

Gracias al filtrado independiente de las sub bandas, cada sub-banda puede ser configurada con diferentes parámetros de forma de onda, según la situación actual del tráfico.

La siguiente imagen resulta muy ilustrativa para mostrar la flexibilidad que ofrece F-OFDM. Cada sub banda tiene su ancho de banda particular, una cantidad de sub portadoras diferentes y un espaciado entre estas diferente también.

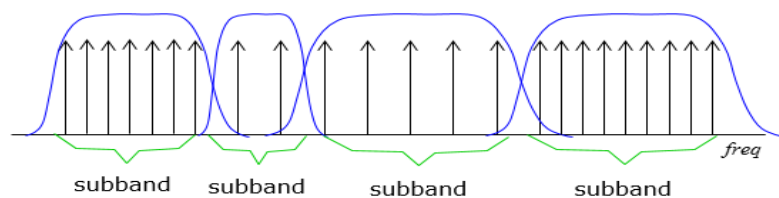


Figura 3.4.b Flexibilidad de las sub-bandas F-OFDM

A continuación, se puede observar la estructura de un transmisor y receptor F-OFDM.

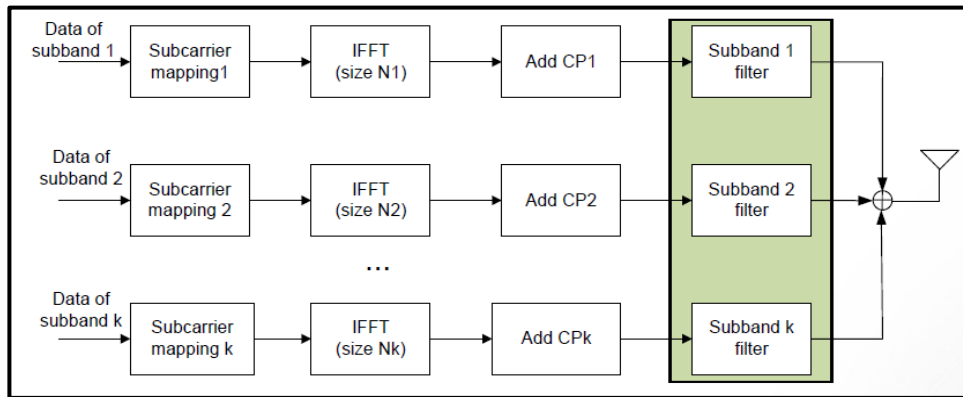


Figura 3.4.c Esquema transmisor F-OFDM

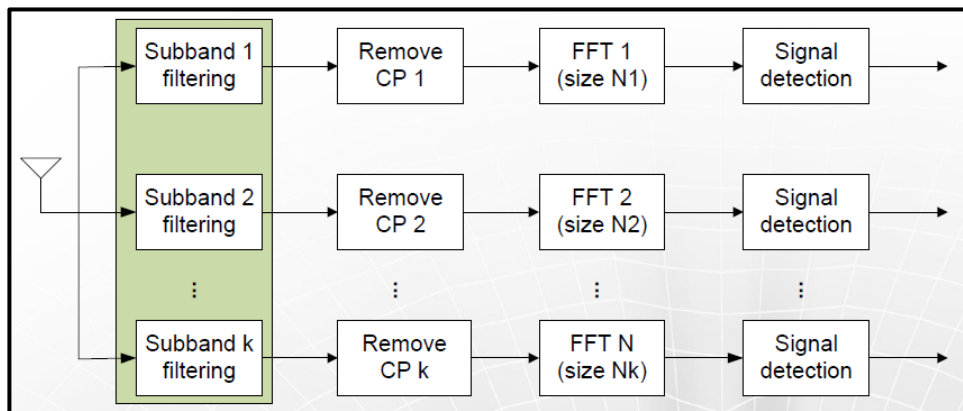


Figura 3.4.d Esquema receptor F-OFDM

La estructura del transmisor F-OFDM revela cómo se trata a cada sub banda de manera independiente. Cada flujo de datos es mapeado en un grupo de portadoras a las que se les asigna un prefijo cíclico de sub banda. La particularización de cada sub banda permite tratar cada una de ellas de forma independiente por lo que cada filtro puede ser de longitud diferente.

En el receptor se procede a la extracción del prefijo cíclico y posteriormente a detección de la señal de cada sub banda. El esquema receptor de F-OFDM tiene una estructura similar a OFDM, de modo que al igual que en OFDM no consume muchos recursos de procesado.

Como en el resto de modulaciones, la clave que permite a F-OFDM disfrutar de los beneficios que proporciona reside en el diseño del filtro. El diseño debe contemplar la compensación entre las características de dominio de tiempo y frecuencia, y debe restringir la dispersión de la energía en el dominio temporal para evitar la interferencia entre símbolos (ISI).

En la siguiente figura se representa la respuesta frecuencial del filtro con las Ventanas implementadas en F-OFDM:

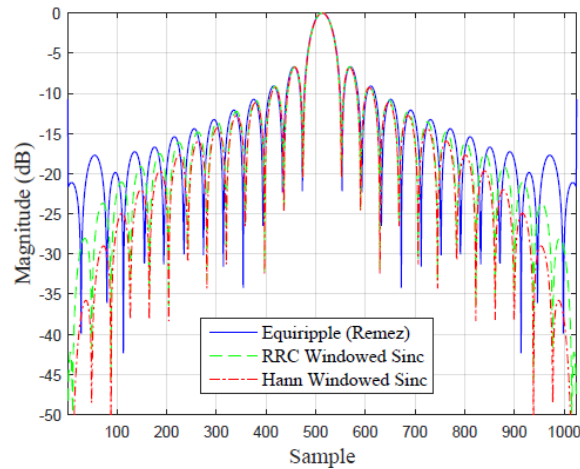


Figura 3.4.e Distintos enventanados de la respuesta frecuencial del filtro en F-OFDM[13]

La respuesta de impulso de un el filtro de paso bajo ideal es una función sinc, que es infinitamente larga. Para la implementación práctica, la función sinc es truncada con diferentes ventanas para lograr un desvanecimiento rápido de la respuesta del filtro y reducir así la ISI entre símbolos OFDM consecutivos [13]. Como se observa en la gráfica, el uso de una ventana Hann proporciona la mejor relación entre lóbulo principal y secundario, de modo que es la que presenta una menor interferencia entre subportadoras adyacentes.

F-OFDM al igual que el resto de modulaciones presentadas logra una mejor ratio PAPR que OFDM y también presenta unos lóbulos laterales menores que en OFDM, proporcionando así una mayor utilización del espectro disponible. A continuación, se muestran las PSD de F-OFDM y OFDM simuladas con Matlab para verificar las mejoras que ofrece F-OFDM.

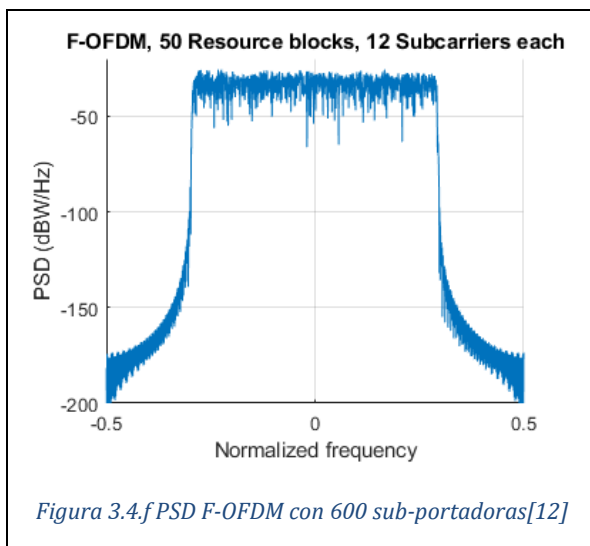


Figura 3.4.f PSD F-OFDM con 600 sub-portadoras[12]

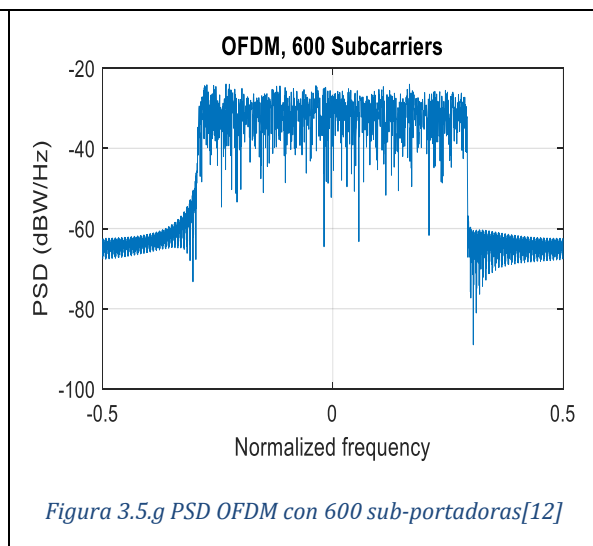


Figura 3.5.g PSD OFDM con 600 sub-portadoras[12]

Peak-to-Average-Power-Ratio for F-OFDM = 11.371 dB

Peak-to-Average-Power-Ratio for OFDM = 9.721 dB

Ventajas de F-OFDM:

- Coexistencia de diferentes formas de onda OFDM, es decir mayor flexibilidad en la parametrización de los recursos
- Soporta Transmisión OFDMA asíncrona [3]
- Mayor eficiencia espectral que OFDM
- F-OFDM MIMO podría volver a utilizar toda la solución OFDM MIMO sin ningún cambio. Con solo 1 tono de protección, F-OFDM MIMO podría lograr el mismo rendimiento que OFDM MIMO con la interferencia de la banda vecina [3].

4. Simulaciones sobre Adalm-Pluto

En este trabajo se han desarrollado distintos modelos de comunicaciones que se han ejecutado en la SDR Adalm-Pluto de Analog Devices. Las simulaciones han sido realizadas mediante Matlab, aunque el objetivo principal era desarrollarlas con Simulink, pero debido a las constantes problemáticas surgidas de la compatibilidad del dispositivo con Simulink, debido a bugs en los distintos release de Mathworks y en las actualizaciones del firmware de Adalm-Pluto, se decidió desarrollar los modelos con el entorno Matlab debido a que se consiguieron solucionar cierta parte de los problemas.

4.1 Sistema QPSK

En este esquema se utilizan tramas de 200 bits de los cuales los 26 primeros son cabecera, 13 bits de código Barker sobremuestreados por 2 para poder generar con precisión 13 símbolos QPSK para su posterior uso en sistema de decodificación. Los bits restantes son de carga útil (161 bits). Los primeros 105 bits de carga útil corresponden a la representación ASCII del mensaje "Hello World XXX" donde XXX representa el índice del mensaje con un rango [001,100].[19]

Los símbolos son muestreados por un factor 4 en el filtro de coseno elevado (Raised Cosine Transmit Filter) de manera que se obtienen unas tasas de $r_m = 100 * 10^3$ muestras/s que equivale a $r_s = 25 * 10^3$ símbolos/s.

4.1.1 Estructura

En `plutoradioqpsktransmitter_init` (script de Matlab) se definen todos los parámetros relacionados con la transmisión de datos. Generamos una estructura de transmisor (`prmQPSKTransmitter`) a partir de los parámetros de simulación definidos en el script

mencionado. Posteriormente, se asigna el puerto donde está el Adalm-Pluto conectado para carga en ese puerto el objeto transmisor.

Por otro lado, en `runPlutoradioQPSKTransmitter(prmQPSKTransmitter)` Se genera un transmisor QPSK con los datos de la estructura del transmisor para modular los datos, y también un objeto transmisor con la estructura de Adalm-pluto al que se le carga la estructura anterior.

```

Rsym: 200000
ModulationOrder: 4
Interpolation: 2
Decimation: 1
Tsym: 5.0000e-06
Fs: 400000
BarkerCode: [1 1 1 1 1 -1 -1 1 1 -1 1 -1 1]
BarkerLength: 13
HeaderLength: 26
Message: 'Hello world'
MessageLength: 16
NumberOfMessage: 100
PayloadLength: 11200
FrameSize: 5613
FrameTime: 0.0281
RolloffFactor: 0.5000
ScramblerBase: 2
ScramblerPolynomial: [1 1 1 0 1]
ScramblerInitialConditions: [0 0 0 0]
RaisedCosineFilterSpan: 10
MessageBits: [11200x1 double]
PlutoCenterFrequency: 915000000
PlutoGain: 0

```

Figura 4.1.4.1.a Parametrización transmisión QPSK

El receptor sigue la misma estructura de código que el transmisor, primero genera una estructura de datos de recepción, luego genera un receptor QPSK y finalmente el objeto receptor Adalm Pluto. El receptor QPSK está constituido por los siguientes módulos que se exponen a continuación:

- El control de ganancia automático establece a su salida una potencia de $1/\text{factor de muestreo}$ en este caso $1/2$ para asegurar una amplitud de señal estable y garantizar una mejor precisión en la estimación en la entrada de la recuperación de portadora y sincronización. Este valor de ganancia se actualiza cada 10 símbolos QPSK.
- Compensación de la frecuencia portadora: utiliza la no linealidad y la FFT para estimar el offset en frecuencia y compensarlo
- Compensación de la frecuencia fina: implementa un bucle de enganche de fase (PLL) para rastrear el desplazamiento de frecuencia residual y el desplazamiento de fase en la señal de entrada
- Recuperación de tiempo: debido al retardo introducido por el canal es necesario el uso de este bloque, que implementa un PLL para corregir el error de temporización en la

señal recibida. El objeto de control actualiza la diferencia de tiempo para el filtro de interpolación, generando interpolantes en instantes de muestreo óptimos. El filtro de interpolación es un filtro parabólico de Farrow con un alfa ajustado a 0.5. [20]

- Decodificador de datos: utiliza un código de Barker para realizar sincronización de cuadros, resolución de ambigüedad de fases y demodulación. Además, el decodificador de datos compara el mensaje regenerado con el mensaje transmitido y calcula la BER.

4.1.2 Resultados

```
Hello world 090
Hello world 091
Hello world 092
Hello world 093
Hello world 094
Hello world 095
Hello world 096
Hello world 097
Hello world 098
Hello world 099
Error rate is = 0.000000.
Number of detected errors = 0.
Total number of compared samples = 2741200
```

Figura 4.1.2.a Resultados simulación QPSK en Adalm-Pluto

Como se observa en la figura, los resultados obtenidos son excelentes. Cabe remarcar que al realizarse con un solo Adalm-Pluto la señal no sufre atenuación en función de la distancia ya que las antenas están separadas por 2 cm.

Se realizó una simulación introduciendo un grupo de atenuadores BNC para ver como afectaba a los resultados. La atenuación introducida fue de 65 dB.

```
Error rate is = 0.000537.
Number of detected errors = 1471.
Total number of compared samples = 2741200.
```

Figura 4.2.2.b Resultados simulación QPSK en Adalm-Pluto con 65 dB de atenuación

4.1.3 Modificaciones y posibles mejoras

Uno de los problemas en los resultados era que gran parte de los mensajes llegaban desincronizados y a raíz de esto muchos de ellos no se podían interpretar.

Se realizaron diversas parametrizaciones con las que se mejoró sensiblemente los resultados, pero la falta de sincronización seguía siendo evidente. De hecho, en algunos casos de simulación, los resultados eran totalmente incoherentes como se puede observar en la siguiente imagen.


```
.%fv]00d+ACx `)!00Z0S~ 02.0N,o tm(d J{ }0y00Q|X%0~$C 3'X'0?:
[#~; I ~B N0C^ 0;)x 0@0000.OVr80G0 ,0C?S0A0<@0>0Zr`..'0<@
F(0\ 0Qy0W0v?94000-vR5B6FFD4)0|C?v00' 4$ %a; ,00b?{ E@00 0>|S|
GS ~d0 7Z00000Q10a00*0zqvQJ'▲[ 400Xq_i 7 '000W 0 {Fcy0▲
P00L<@ 0v0 0\074> 0_zqr0pN0F"*kmQwRp0vp 8, 0Y002/\Cu9;X,
Number of detected errors = 1347569.
Total number of compared samples = 2648800.
```

Figura 4.2.3.a Errores de sincronización en simulación QPSK

Este modelo Matlab fue diseñado para 2 módulos SDR Adalm-Pluto. Se realizaron algunas modificaciones para adaptar el modelo a un solo SDR, pero los resultados no eran óptimos.

La solución se detectó a causa de un error con el modelo LTE OFDM, que tiene el origen en cómo se gestiona el puerto USB a través de Matlab. El problema residía en que cuando se generaba y se cargaba el objeto transmisor con la estructura para Adalm-Pluto, el recurso de comunicación del puerto USB permanecía ocupado y no se podía ejecutar el receptor al mismo tiempo de forma correcta, porque no existía en ese momento un recurso disponible.

La solución fue añadir un esquema de transmisión repetitiva en bucle para que fuera capaz de sincronizarse y liberar así el recurso de comunicación por USB para generar la transmisión, de tal modo que se pudo añadir el modelo receptor en el mismo script y así solventar los errores relacionados con la gestión de dispositivos USB.

Posibles mejoras:

- Incluir diagrama de constelación de los símbolos recibidos
- Solucionar problema con la liberación de recursos del receptor. Existe algún comportamiento desconocido que impide liberar los recursos del objeto receptor, esto implica que cada vez que se quiera ejecutar el modelo hay que abrir una nueva sesión en Matlab.

4.2 Sistema OFDM

A diferencia del modelo QPSK, este modelo OFDM si fue diseñado para poder ejecutarse sobre un solo modulo SDR. El problema pero, es que estaba diseñado para 3 modelos SDR concretos que utilizaban el transceptor ágil AD9361 o bien el AD9364 y además la comunicación con Matlab se realizaba a través de Ethernet y Adalm-Pluto solo puede comunicar por USB. Otro aspecto que se ha tenido en cuenta en el momento de realizar las modificaciones pertinentes es que el módulo Adalm-Pluto utiliza el AD9363.

Prestaciones AD9363 [22]:

- Ancho de banda de la señal: 200KHz a 20 MHz (encaja con requisitos LTE).
- Tuning range [325 MHz a 3.8 GHz], con el paquete de soporte para Matlab se amplía la ventana a [70 MHz a 6 GHz]
- Frecuencia de muestreo [520 KHz a 61.44 MHz]

Para poder adaptar el Adalm-Pluto al transmisor y receptor LTE-OFDM se han realizado las modificaciones comentadas en 4.3.3 al script de Matlab para poder integrarlo. Estos fueron diseñados para correr en AD9361/AD9364 y en 3 FPGA concretas como son 'ZC706 and FMCOMMS2/3/4', 'ZedBoard and FMCOMMS2/3/4' o 'ADI RF SOM' [11]. El dispositivo Adalm-Pluto integra el módulo transceptor RF AD9363 que es de la misma familia, pero difieren en algunos aspectos como el rango frecuencial de operación, el ancho de canal o número de antenas tx/rx, entre otros.

Los resultados que presenta la simulación son, el espectro de la señal OFDM-LTE recibida, los símbolos del canal PDSCH (Physical Downlink Shared Channel), la estimación de la respuesta frecuencial del canal, la imagen recibida y la BER.

El canal PDSCH transmite habitualmente información de usuario. Contiene la información entregada por la capa MAC mediante el canal transporte Downlink Shared Channel (DL-SCH). También puede transportar información de aviso (PCH) y aquella de radiodifusión que no sea imprescindible para que el terminal móvil se conecte a la red. [21]

4.2.1 Estructura

Para el bloque transmisor se genera la estructura con los datos de simulación pertenecientes a la transmisión, posteriormente se asigna a la estructura las propiedades la estructura del transmisor de Adalm-Pluto y finalmente se genera el objeto destinado a transmitir la imagen.

Se definen a parte varios parámetros relacionados con LTE como el ancho de canal asignado (en este caso 10MHz), el identificador de celda (88) entre otros. Una vez parametrizado el sistema se asigna el input de datos a transmitir en este caso una imagen.

Se añade el mecanismo de transmisión repetitiva en bucle del transmisor para poder liberar el recurso USB y que Matlab a continuación pueda generar el objeto en recepción sin que haya conflicto en el uso de recursos en la gestión USB.

La definición del bloque receptor sigue la misma mecánica que el transmisor. Aunque a parte se definen otros parámetros de recepción como el tipo de datos de salida o el tipo de control de ganancia entre otros. Además, se modifica también la estructura del receptor para adaptarla a la estructura que ofrece el objeto receptor Adalm-Pluto.

4.2.2 Resultados

A continuación, se muestran las figuras relacionadas con los resultados de la creación de la forma de onda transmitida, la verificación de ciertos parámetros LTE como el CellID para constatar que los datos de simulación son ejecutados correctamente y la decodificación del MIB (Master Information Block) a través del canal de transporte DL-SCH.

```
Corrected a frequency offset of -2.468765e+00 Hz.
Detected a cell identity of 88.
Performing DL-SCH Decode for frame 1 of 5 in burst
Successful MIB Decode.
Frame number: 701.
Retrieving decoded transport block data.
```

Figura 4.2.2.a Corrección del offset y detección de celda en la transmisión OFDM-LTE

En las siguientes figuras se incluyen los resultados de la simulación de la transmisión de una imagen mediante una señal OFDM según el estándar LTE. Se han realizado distintas pruebas para ver las prestaciones del SDR en distintos casos. Debido a que no se cuenta con otro modulo SDR para realizar pruebas en función de la distancia, se han desarrollado pruebas con el SDR sin antenas o con atenuadores.

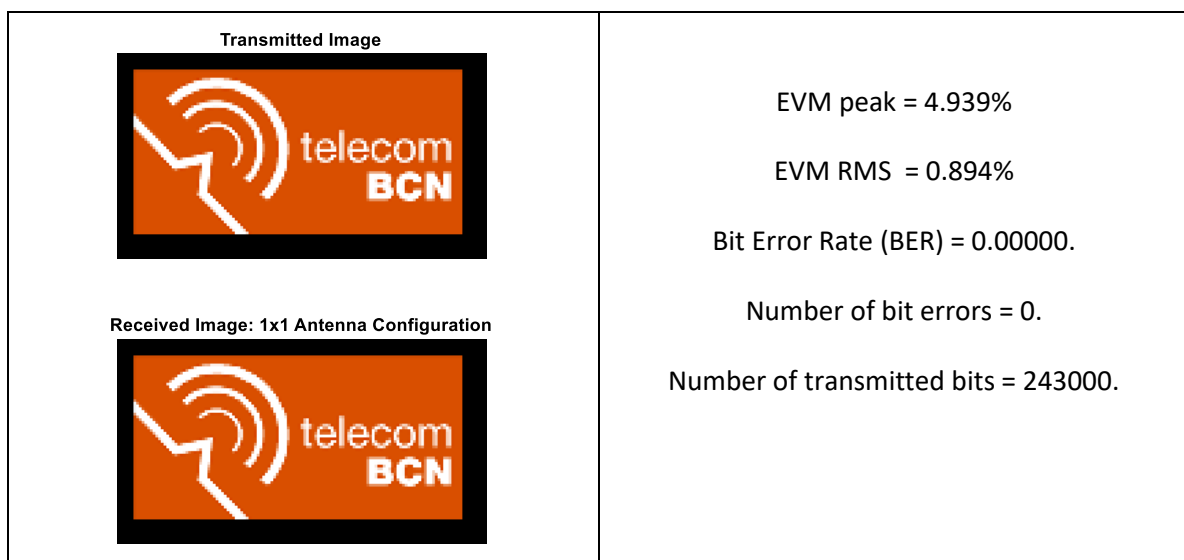


Figura 4.2.2.b Resultados de la transmisión de la imagen con OFDM-LTE

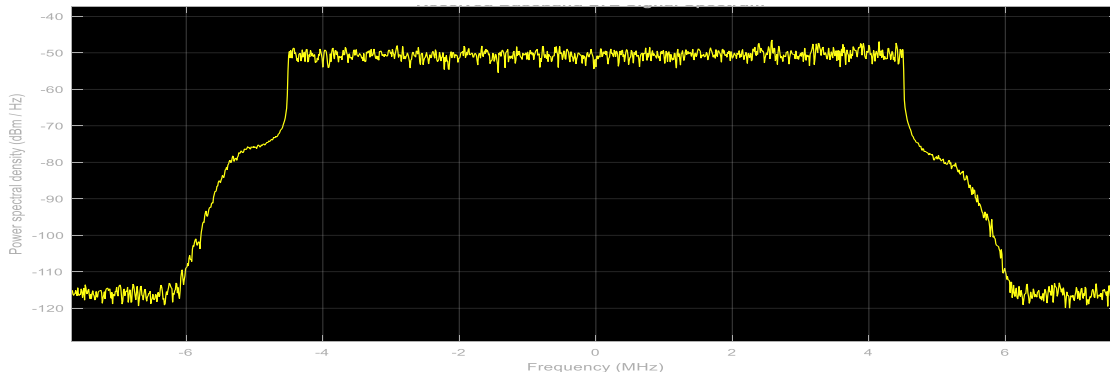


Figura 4.3.2.c PSD de la señal OFDM recibida

En la figura anterior se muestra la PSD de la señal OFDM recibida con el ancho de banda asignado de 10MHz.

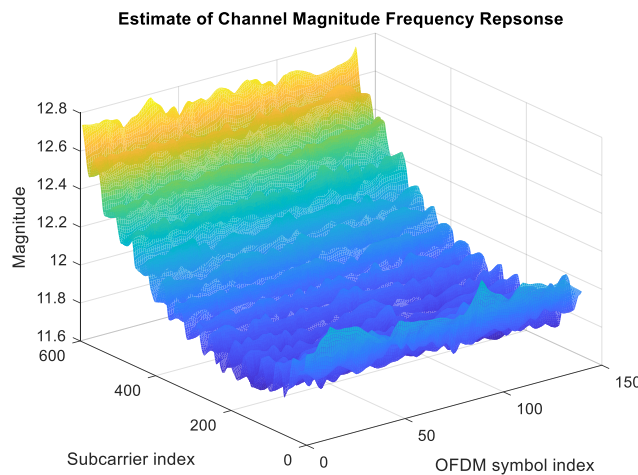


Figura 4.4.2.d Estimación de la respuesta frecuencial del canal

En la figura anterior se demuestra el comportamiento del canal. Se puede observar que la respuesta frecuencial es mejor en el último rango de sub portadoras (400-600).

Como se puede observar la recepción de la imagen es perfecta. Se puede constatar con el valor de la BER en este caso 0. Para cuantificar el rendimiento del transmisor y receptor de Adalm-Pluto en este escenario se utiliza el EVM. En el caso ideal el EVM sería 0, pero debido a las imperfecciones del sistema como la fuga de portadora, ruido de fase [23] u otros aspectos presenta un valor medio del 0.89%. Este dato refleja que los símbolos han sufrido un desplazamiento medio respecto al valor de referencia de un 0.89%. Este valor, no es suficiente para perjudicar la transmisión como se ha podido observar.

En la siguiente figura se muestra la constelación de los símbolos recibidos y ecualizados del canal PDSCH. Efectivamente resulta difícil ver algún offset en alguno de los símbolos. Se han marcado los símbolos en los que se puede ver el efecto del valor del EVM.

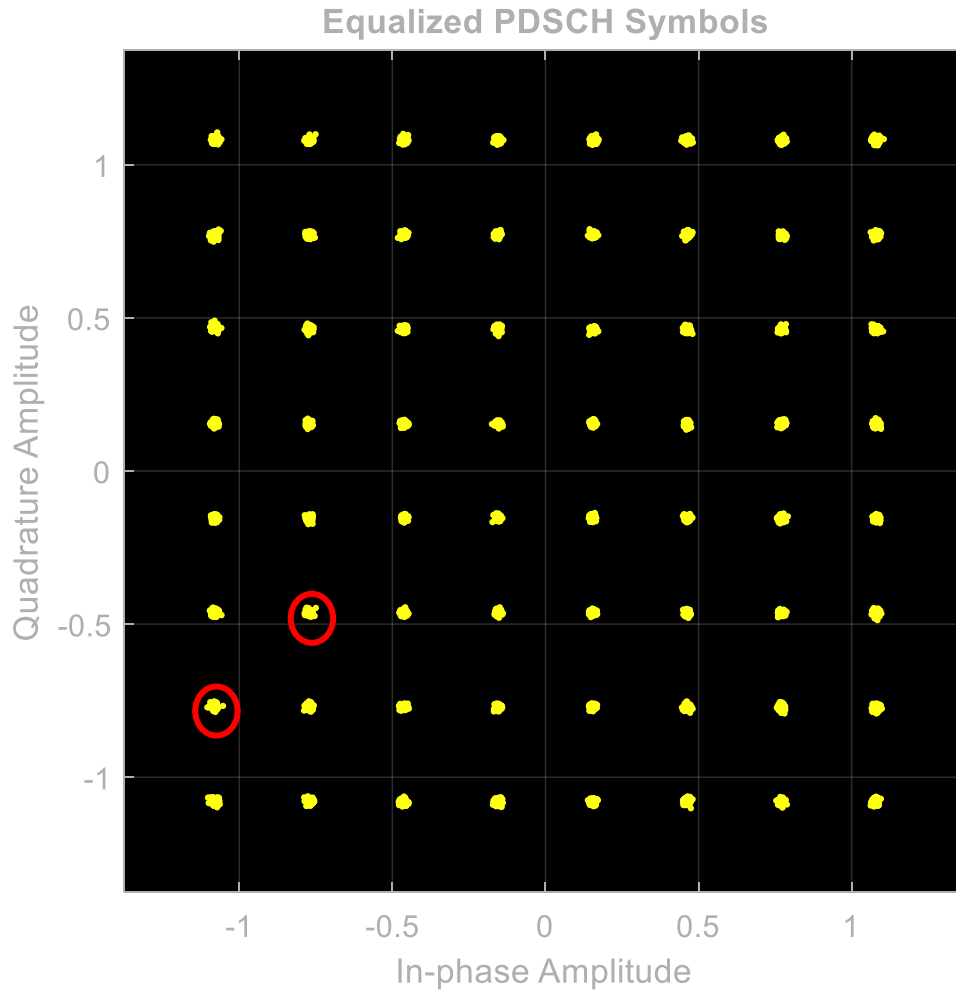


Figura 4.2.2.e Constelación de los símbolos PDSCH ecualizados recibidos

En la imagen anterior se puede observar el resultado indicado en 4.2.2.b sobre el EVM. El valor pico que alcanza el EVM, es decir el desplazamiento máximo que alcanza un símbolo respecto su zona de referencia es de 4.939% y se puede observar en las referencias marcadas en rojo en la constelación.

A continuación, se presentarán los resultados de las distintas pruebas realizadas con el modelo OFDM-LTE y se mostrarán los resultados más significativos en cada uno de los escenarios simulados.



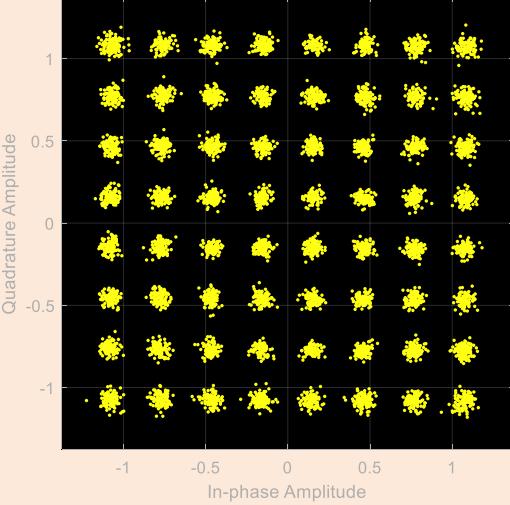


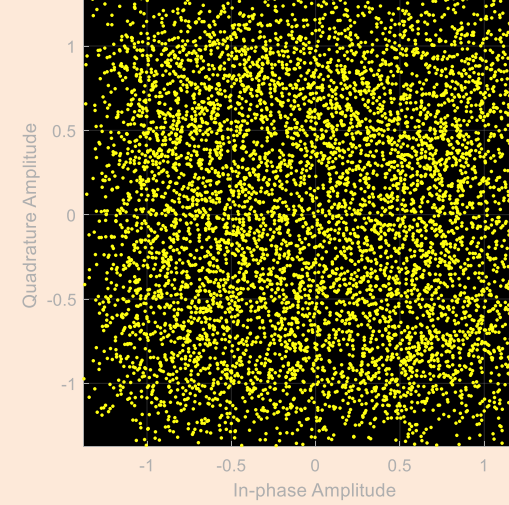
Atenuador de 65dB	Sin antenas
<p style="text-align: center;">Transmitted Image</p>  <p style="text-align: center;">Received Image: 1x1 Antenna Configuration</p>  <p style="text-align: center;">Equalized PDSCH Symbols</p> 	<p style="text-align: center;">Transmitted Image</p>  <p style="text-align: center;">Received Image: 1x1 Antenna Configuration</p>  <p style="text-align: center;">Equalized PDSCH Symbols</p> 
<p style="text-align: center;">EVM peak = 16.792%</p> <p style="text-align: center;">EVM RMS = 4.378%</p> <p style="text-align: center;">Bit Error Rate (BER) = 0.00000.</p> <p style="text-align: center;">Number of bit errors = 0.</p> <p style="text-align: center;">Number of transmitted bits = 243000.</p>	<p style="text-align: center;">EVM peak = 357.360%</p> <p style="text-align: center;">EVM RMS = 80.428%</p> <p style="text-align: center;">Bit Error Rate (BER) = 0.15658.</p> <p style="text-align: center;">Number of bit errors = 38050.</p> <p style="text-align: center;">Number of transmitted bits = 243000.</p>
<p>En este caso la recepción de la imagen ha presentado la misma calidad que en el caso anterior sin atenuadores. Así pues, el desplazamiento de símbolo de pico de 16,79% no produce errores en el decisor y la BER se mantiene en 0.</p>	<p>Se ha realizado esta simulación para verificar la existencia de un posible caso fallido.</p>

Figura 4.2.2.f Comparativa de los resultados de la simulación OFDM-LTE

4.2.3 Modificaciones y posibles mejoras

Este modelo fue diseñado para 3 módulos SDR (ZC706 and FMCOMMS3 or ADI RF SOM) y Adalm-Pluto no era uno de ellos. Estos módulos SDR se comunican con Matlab via Ethernet a través de una dirección IP previamente asignada.

La primera modificación que se realizó fue cambiar la interfaz Ethernet por USB ya que Adalm-Pluto solo cuenta con interfaz USB. Para lograrlo se modificó el escaneo del dispositivo donde generar los objetos para transmisor y receptor.

La siguiente modificación fue substituir las creaciones de los objetos de transmisión y recepción de las otras SDR por los correspondientes para Adalm-Pluto. Las estructuras definidas de las otras SDR no eran compatibles con Adalm-Pluto.

Se adaptó la estructura de los objetos TX/RX de Adalm para que se semejara lo más posible a las de los otros módulos SDR.

Llegados a este punto, el modelo compiló, pero Matlab no era capaz de compilar simultáneamente el transmisor y el receptor, por lo que no se podía realizar ninguna simulación.

El problema residía en como Matlab gestiona los dispositivos por USB. Mientras se ejecutaba el transmisor el canal del puerto USB permanecía ocupado de modo que no se podía iniciar el receptor en ese momento. La solución a este problema, fue incluir el modo de transmisión repetitivo en bucle para poder ejecutar los dos esquemas al mismo tiempo.

4.3 Sistema F-OFDM

Se decidió implementar un sistema F-OFDM debido a la esquemática más sencilla que presenta frente a las otras modulaciones estudiadas en este trabajo.

El OFDM filtrado (F-OFDM) aplica un filtro a los símbolos después de realizar la IFFT en el bloque transmisor para mejorar el ancho de banda mientras se mantiene la ortogonalidad de los símbolos complejos. En este modelo se quiere implementar un transmisor F-OFDM y adaptarlo para Adalm-Pluto. Este transmisor tiene las siguientes características [24]:

- NDLRB (asignación del ancho de banda mediante el número de RBs) = 108;
- SubcarrierSpacing = 60*1e3; %Hz
- CellRefP = 1;

- CyclicPrefix = 'Normal';
- FilterLength = 513;
- CyclicExtension = 'off';

La información a transmitir, es la estructura de parametrización del sistema F-OFDM, por ello se ha cargado en estructura del transmisor Adalm-Pluto la información de los parámetros anteriores.

4.3.1 Resultados

No se ha conseguido adaptar el modelo F-OFDM, debido a que no se ha conseguido que Matlab ejecute el método de transmisión repetitiva en bucle para este ejemplo. La ejecución de este método es necesaria como se ha visto en los dos sistemas anteriores para poder desarrollar la comunicación simultanea entre transmisor y receptor garantizando la sincronización y la correcta liberación de los recursos USB gestionados por Matlab.

La otra problemática es que en este modelo se hace uso de bloques HDL implementados en simulink. La compatibilidad entre simulink y Adalm-Pluto es un frente que nunca se ha conseguido superar en este trabajo. El modelo QPSK se empezó a adaptar en simulink pero el comportamiento y los resultados de las simulaciones siempre fueron incoherentes y no se llegó a encontrar una solución para garantizar la compatibilidad entre Adalm-Pluto y Simulink.

A continuación, se muestran los resultados simulados a nivel software de la generación de una señal F-OFDM:

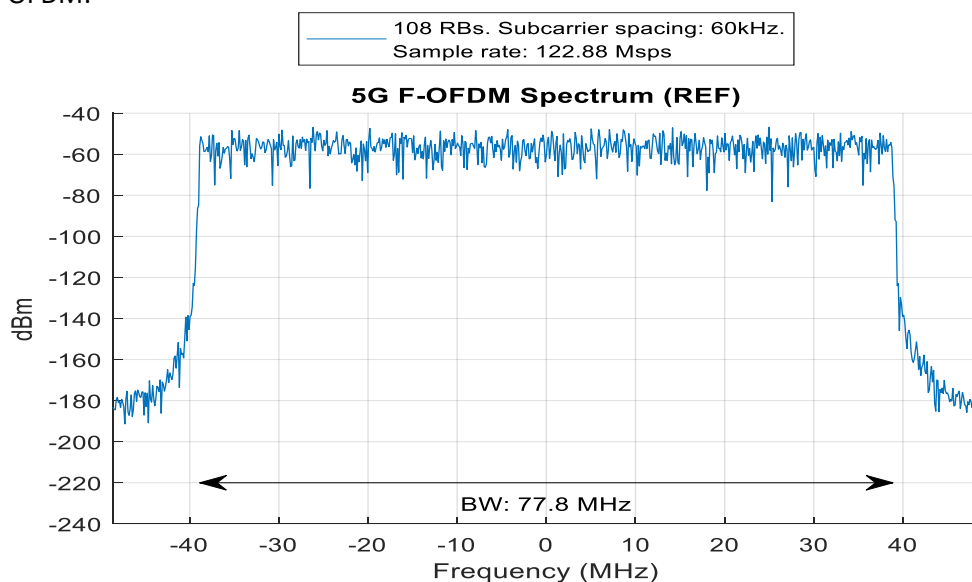


Figura 4.3.1.a Espectro de la señal F-OFDM simulada a nivel software

En esta figura se observa la PSD de la señal F-OFDM generada, que presenta un ancho de banda de 77,8 MHz, una radiación fuera de banda de -180 dBm en la transmisión de 108 bloques de recursos con un espaciado entre subportadoras de 60 kHz. La PSD simulada concuerda con la forma de onda F-OFDM estudiada en este trabajo. El nivel de radiación fuera de banda está muy por debajo del nivel de la señal útil, 120 dB. Así pues, se puede constatar mediante la simulación la baja interferencia entre bandas que proporciona F-OFDM proporcionando así una gran eficiencia espectral.

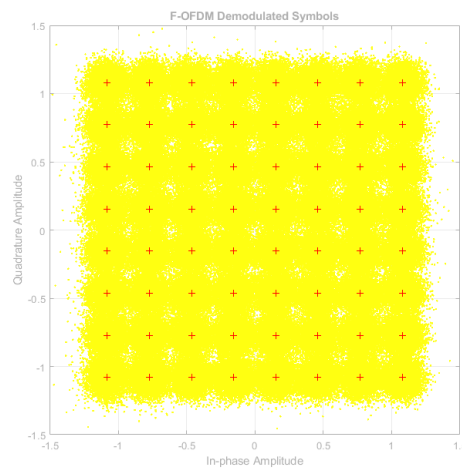


Figura 4.3.1.b Constelación de los símbolos F-OFDM demodulados

F-OFDM Reception (REF) BER = 0.0094613 at SNR = 18 dB

La constelación de los símbolos F-OFDM con una SNR de 18dB presenta ciertos símbolos fuera de la zona de decisión correcta, motivo por el cual se observa que el valor de la BER es superior a 0.

4.3.2 Posibles mejoras

La primera mejora a implementar es solucionar el problema con la ejecución del método de transmisión repetitiva en bucle. Como ya se ha mencionado y demostrado, la ejecución de este método es necesaria ejecutar el modelo sobre un SDR Adalm-Pluto por la problemática en la gestión de los recursos USB que realiza Matlab.

Una vez solventada la problemática con la transmisión repetitiva en bucle sería idóneo implementar la lectura del EVM y la PAPR como en los sistemas presentados anteriormente.

Después de tener el bloque transmisor correctamente diseñado se debería generar bloque receptor con la estructura de Adalm-Pluto adaptada al modelo de Mathworks para F-OFDM.

Cabe resaltar que si se quiere trabajar con este modelo se debe garantizar la compatibilidad de Adalm-Pluto con Simulink, ya que como se ha mencionado se hace uso de bloques HDL en Simulink.

5. Presupuesto

Trabajo	Tareas	Horas	Precio/hora	Coste
Investigación	Aprendizaje acerca del modulo SDR Adalm-Pluto	20	15	300
	Aprendizaje Simulink	15	15	225
	Lectura de tesis y artículos sobre el 5G	30	15	450
	Estudio candidatos 5G	65	15	975
	Lectura evolución comunicaciones móviles	5	15	75
Documentación	Redactar plan de trabajo	10	15	150
	Redactar revisión crítica	10	15	150
	Redactar memoria final	50	15	750
	Revisión memoria final	5	15	75
Simulaciones	Simulación QPSK	15	15	225
	Simulación OFDM-LTE	30	15	450
	Simulación F-OFDM	15	15	225
Equipo hardware	Modulo SDR Adalm-pluto	-	-	124,94
	Pack atenuadores BNC (total 65 dB)	-	-	103,96
Coste Total				4.278,90

Tabla 5.a Presupuesto

Nota: no se incluye el software de Mathworks Matlab & Simulink debido a que se adquirido mediante la licencia de estudiante con coste 0.

6. Conclusiones y futuro desarrollo:

Cada una de las modulaciones estudiadas ofrece mejores prestaciones de OFDM. En la elección de cual es la más idónea para el 5G depende de cual sea el objetivo principal a cubrir.

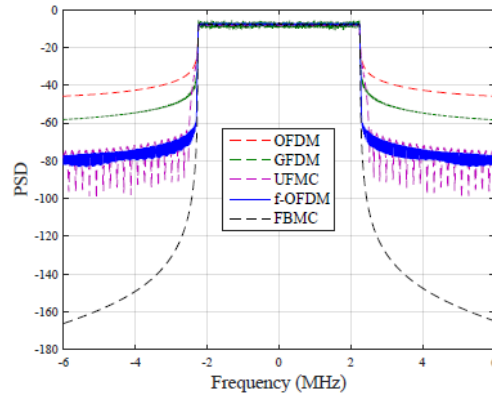


Figura 6. a Comparativa PSD OFDM, FBMC, UPMC, GFDM y F-OFDM [13]

En términos de radiación fuera de banda FBMC es la que presenta mejores prestaciones por lo que es la que presenta menor interferencia entre bandas y mayor eficiencia espectral pero también necesita más recursos de procesado debido a la longitud del filtro.

No obstante, según el entorno y la situación cada una de las modulaciones ofrece distintas características. F-OFDM ofrece una gran flexibilidad por lo que resulta muy atractiva para gestionar la gran variedad de servicios que se esperan para el 5G. Además, ofrece sencillez a nivel de procesado, pero no ofrece una gran precisión a nivel de sub portadora y sigue requiriendo el uso de CP, de modo que en ese aspecto pierde un poco de eficiencia espectral.

Por otro lado, GFDM ofrece flexibilidad en el ajuste de la radiación fuera de banda y resulta óptima para sistemas MIMO.

Finalmente, UPMC se encuentra en una posición intermedia entre los candidatos ofreciendo más precisión que F-OFDM a nivel de sub-portadora, no al nivel de FBMC, pero necesita menos recursos de procesado. Además, resulta óptima para la transmisión de ráfagas cortas.

En la parte práctica se ha constatado que el entorno de Mathworks para Adalm-Pluto aún esta muy verde. El soporte que ofrece solo ha tenido 141 descargas, síntoma evidente de que muy pocos se han atrevido a probarlo con Mathworks. El dispositivo en sí, ha terminado respondiendo como se esperaba, aunque han sido muchos los problemas que han surgido por falta de compatibilidad. Estos problemas han ido mejorando ciertamente según lanzaban release de Mathworks y del firmware. Para poder seguir trabajando con Adalm-Pluto, recomendaría buscar otro entorno de desarrollo.

Futuro desarrollo:

- Solucionar los problemas en el modelo F-OFDM, para ello debe resolverse una correcta compatibilidad entre simulink y Adalm-Pluto, y arreglar el problema con la transmisión en bucle.
- Probar otro entorno de desarrollo para Adalm-Pluto para ver si el dispositivo responde mejor que con Matlab y Simulink.
- Solventar los problemas de liberación de recursos en OFDM-LTE.
- Implementar un formato de modulación 5G que requiera más recursos que F-OFDM.
- Si se consigue estabilidad con algún modelo 5G, realizar alguna prueba experimental con el SDR en movimiento para simular un entorno de un vehículo inteligente.

Bibliografía:

- [1] Universidad Internacional de Valencia, “Evolución de la red de comunicación móvil, del 1G al 5G” [Online] Available: <https://www.universidadviu.es/evolucion-la-red-comunicacion-movil-del-1g-al-5g/>
- [2] Nokia, “5G uses Cases” [Online] Available: https://www.ramonmillan.com/documentos/bibliografia/5GUseCases_Nokia.pdf
- [3] Altera University Program “1st 5G Algorithm Innovation Competition-F-OFDM”
- [4] Mathworks, “FBMC vs OFDM” [Online] Available: <https://es.mathworks.com/help/comm/examples/fbmc-vs-ofdm-modulation.html>
- [5] Yunlong Cai, Zhijin Qin, Fangyu Cui, Geoffrey Ye Li, and Julie A. McCann “Modulation and Multiple Access for 5G Networks”. 21 Feb 2017
- [6] Robin Gerzaguet, Nikolaos Bartzoudis, Leonardo Gomes Baltar, Vincent Berg, Jean-Baptiste Doré, Dimitri Ktésas, Oriol Font-Bach, Xavier Mestre, Miquel Payaró, Michael Färber and Kilian Roth “The 5G candidate waveform race: a comparison of complexity and performance”. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking 2017
- [7] 5G Waveform: optimised OFDM. [Online] Available: <https://www.electronics-notes.com/articles/connectivity/5g-mobile-wireless-cellular/waveform-optimised-ofdm.php>
- [8] Luis Orús Gracia, “Simulation test of 5G Mobile and Transport Networks”. ETSETB, Universitat Politècnica de Catalunya, JUNE 2017
- [9] S. Srivastava and O. Sahu. “On the Role of the Overlapping Factor in FBMC-SMT Systems” MECS/GSP, pp. 31-37, Feb. 2015.
- [10] Mathworks, “UFMC vs OFDM” [Online] Available: <https://es.mathworks.com/help/comm/examples/ufmc-vs-ofdm-modulation.html>
- [11] Mathworks, “Transmit and receive LTE MIMO using a single Analog Devices AD9361/AD9364”. [Online] Available: https://es.mathworks.com/help/supportpkg/xilinxzynqbasedradio/examples/transmit-and-receive-lte-mimo-using-a-single-analog-devices-ad9361-ad9364.html?searchHighlight=LTE%20MIMO%20Using%20a%20Single%20Analog%20Devices%20AD9361%20AD9364&s_tid=doc_srchtile
- [12] Mathworks, “F-OFDM vs OFDM” [Online] Available: https://es.mathworks.com/help/comm/examples/f-ofdm-vs-ofdm-modulation.html?s_tid=srchtitle
- [13] Xi Zhang, Ming Jiay, Lei Chen, Jianglei May, Jing Qiu Chengdu Research & Development Centre, Huawei Technologies Co., Ltd., People’s Republic of China Ottawa Research & Development Centre, Huawei Technologies Canada Co., Ltd., Canada “Filtered-OFDM — Enabler for Flexible Waveform in the 5th Generation Cellular Networks”

- [14] F. Schaich, T. Wild and Y. Chen. "Waveform contenders for 5G suitability for short packet and low latency transmissions". IEEE/VTC, pp. 1-5, May 2014.
- [15] Entrevistas en MWC "Brief overview about 5G" [Online] Available: <https://www.youtube.com/watch?v=SsubE1xbQ0U>
- [16] Muhammad Sameen¹, Dr Adnan A. Khan², Inam Ullah Khan ¹, Nazia Azim², Dr Imran Shafi³ "Comparative analysis of OFDM and GFDM" 2 December 2016.
- [17] Gerhard Fettweis, Marco Krondorf and Steffen Bittner "GFDM - Generalized Frequency Division Multiplexing" Vodafone Chair Mobile Communications Systems Technische Universität Dresden, Germany
- [18] Alex Viorreta Gómez, "Toward to design of 5G Optical Communications", Barcelona, June 2017
- [19] Mathworks, "QPSK Transmitter with Adalm-Pluto radio" [Online] Available : <https://es.mathworks.com/help/supportpkg/plutoradio/examples/qpsk-transmitter-with-adalm-pluto-radio.html>
- [20] Mathworks, "QPSK Receiver with Adalm-Pluto radio" [Online] Available : <https://es.mathworks.com/help/supportpkg/plutoradio/examples/qpsk-receiver-with-adalm-pluto-radio.html>
- [21] Ameer Abbas and S.J. Thiruvengadam, "Realization of PDSCH transmitter and receiver architecture for 3GPP-LTE advanced" Conference Paper · March 2016
- [22] Analog Devices, "Datasheet AD9363 Analog Devices RF Agile transceiver" [Online] Available: <http://www.analog.com/en/products/rf-microwave/integrated-transceivers-transmitters-receivers/wideband-transceivers-ic/ad9363.html#product-documentation>
- [23] Wikipedia, "Error Vector Magnitude" [Online] Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Error_vector_magnitude
- [24] Mathworks, "HDL code generation for filtered OFDM transmitter" [Online] Available: https://es.mathworks.com/help/ltehdl/examples/hdl-code-generation-for-filtered-ofdm-f-ofdm-transmitter.html?searchHighlight=F-OFDM%20xilinx&s_tid=doc_srchtile
- [25] Jordi Pérez-Romero, Oriol Sallent y Ferran Casadevall "RCOM Tema 1 Introducción a las comunicaciones móviles "ETSETB, 2015
- [26] Robin Getz and Michael Hennerich "Adalm-Pluto Tricks" Analog Devices 02 April 2018
- [27] Mathworks, "Adalm-Pluto support package" [Online] Available: <https://es.mathworks.com/hardware-support/adalm-pluto-radio.html>

Glosario:

OFDM- Orthogonal Frequency Division Multiplexing

FBMC- Filter Bank Multi-Carrier

GFDM- Generalised Frequency Division Multiplexing

F-OFDM- Filtered Orthogonal Frequency Division Multiplexing

SDR- Software Defined Radio

QPSK- quadrature phase-shift keying

LTE- Long Term Evolution

FPGA- Field Programable Gate Array

PSD- Power Spectral Density

NTT- Nippon Telegraph and Telephone

GSM- Global System for Mobile communications

GPRS- General Packet Radio Service

EDGE- Enhanced data for global evolution

WAP- Wireless Application Protocol

UMTS- Universal Mobile Telecommunications System

CDMA- Code Division Multiple Access

HSPA- High Speed Downlink Packet Access

FDD- Frequency División Duplexing

MC-CDMA- Multi-carrier code-division multiple access

M2M- Machine to Machine

MIMO- Multiple Input Multiple Output

MMIMO- Massive Multiple Input Multiple Output

IOT- Internet Of Things

CP- Cyclic prefix

OQAM- Offset Quadrature Amplitude Modulation

QAM- Quadrature Amplitude Modulation

FMT- Filtered-Multi-Tone

TEDS- Telecommunications Equipment Distribution Service

FIR- Finite Impulse Response

IDFT- Inverse Discrete Fourier Transform

PAPR- Peak-to-Average Power Ratio

BER- Bit Error Rate

SNR- Signal to Noise Ratio

TTI- Transmission Time Interval

TDD- Time Division Duplex

SC-FDM- Single Carrier Frequency Division Multiplexing

RRC- Raise Root Cosine

ISI- InterSymbol Interference

PLL- Phase-Locked Loop

RB- Resource Block

SISO- Single Input Single Output

PDSCH- Physical Downlink Shared Channel

MIB- Master Information Block

EVM- Error Vector Magnitude