

Grado Universitario en Ingeniería en Tecnologías de
Telecomunicación
2017-2018

Trabajo Fin de Grado

“Técnicas Avanzadas de Comunicaciones Radio para 5G con MIMO Masivo”

Francisco Javier Cepeda Cabeza

Tutora

Dra. María Julia Fernández-Getino García

Escuela Politécnica Superior - Leganés, 2018



Esta obra se encuentra sujeta a la licencia Creative Commons
Reconocimiento – No Comercial – Sin Obra Derivada

RESUMEN

En las últimas décadas, se ha producido en la sociedad un cambio drástico en la manera de comunicarse; se podría considerar que ha tenido lugar una revolución en las comunicaciones y, tras ella, la necesidad de ser capaces de transmitir la información de manera más rápida (tras una mejora de tasa binaria), eficaz, en mayores cantidades y con menor probabilidad de error (*QoS, quality-of-service*) se ha convertido en un objetivo necesario para satisfacer la demanda que las nuevas tecnologías de comunicación requieren para una sociedad cada vez más conectada. Estos requisitos son especialmente buscados en tecnologías de transmisión inalámbricas donde serán caso de estudio las técnicas avanzadas de comunicación de los sistemas de comunicaciones de banda ancha celulares de quinta generación (5G) que sean capaces de cumplir con los requisitos que los avances tecnológicos y la sociedad demandan.

Entre las diversas tecnologías de transmisión inalámbricas, en este estudio, se hará hincapié en el novedoso método de Múltiples entradas-Múltiples salidas (*Multiple-Input and Multiple-Output, MIMO*) con el que se consigue aumentar la tasa binaria y reducir la tasa de error de bit usando múltiples antenas tanto para la transmisión como para la recepción. Junto con MIMO, la técnica de transmisión usada y estudiada en el trabajo, por sus ventajas, es la multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales (OFDM). Posteriormente, se analizará uno de los métodos más avanzados de radiocomunicación MIMO, denominado como MIMO Masivo (*Massive MIMO*), en el que el número de antenas en transmisión y recepción aumentan considerablemente. Los múltiples canales que se generan en estos entornos masivos, requieren una gran cantidad de información piloto para su estimación. Esto se traduce en una pérdida de tasa binaria y al problema de interferencia entre pilotos de distintas celdas se le conoce como Contaminación de Pilotos (*Pilot Contamination*). Se estudiarán diversos escenarios con varias redes de celdas en los que se tienen en cuenta diferentes factores (distancia entre estaciones de transmisión) y entornos (desvanecimientos de señal por interferencias, contaminación de señales piloto...). Finalmente, se tratará de analizar y simular posibles soluciones para uno de los mayores problemas de MIMO Masivo en redes celulares, la contaminación de pilotos (*Pilot Contamination*).

Palabras clave

Comunicaciones móviles; 5G; OFDM, MIMO masivo; Pilot Contamination

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría agradecer por la elaboración de este Trabajo de Fin de Grado a todas las personas que han hecho posible el largo y sufrido recorrido para ser capaz de llevar a cabo el Grado. En primer lugar y especialmente, a mis padres y a mi hermana, sin ellos nada de esto hubiera sido posible. Gracias por la educación que me habéis dado y el esfuerzo que habéis hecho durante tanto tiempo para llegar a ser la persona que soy hoy y por la trayectoria que me habéis ofrecido.

A mi tutora, la Doctora María Julia Fernández-Getino, Directora de Grado, por confiar en todo momento en mi y darme tanta libertad y flexibilidad.

A mis compañeros y amigos de la Escuela, sin ellos, el tedioso recorrido para conseguir lo que parecía inconseguible no hubiera sido posible. Gracias por estar en los momentos más difíciles y por ayudarme a seguir adelante en los momentos donde todo parece perdido. Con constancia y trabajo (y algo de cabezonería), todo acaba saliendo.

A la Universidad Carlos III de Madrid y a la Universidad de Lund, por ser mis dos casas durante este periodo de formación tan importante.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Motivación y contexto del proyecto	1
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Organización de la memoria	4
2. ESTADO DEL ARTE	6
2.1 Evolución de las Comunicaciones Móviles y Taxonomía.....	6
2.2 Futuro y Tecnologías Emergentes	15
2.3 Técnicas Modernas de Comunicación en 5G.....	21
2.4 Estudios Previos de MIMO Masivo.....	24
3. MARCO REGULADOR.....	26
3.1 Legislación Aplicable	26
3.2 Estándares Técnicos.....	28
3.3 Propiedad Intelectual y Patentes	31
4. ENTORNO SOCIO-ECONÓMICO	34
4.1 Impacto socio-económico	34
4.2 Impacto Medioambiental	36
4.3 Presupuesto de Elaboración del TFG.....	38
4.3.1 Recursos de Software	38
4.3.2 Recursos de Hardware.....	39
4.3.3 Costes Humanos.....	39
4.3.4 Coste Total del TFG.....	40
5. CONCEPTO BÁSICO DE OFDM	41
6. PRINCIPIOS DE MIMO MASIVO	47
6.1 Concepto de Multi-Antena (MIMO).....	47
6.2 Extensión a Múltiples Antenas: MIMO Masivo.....	53
6.3 Contaminación de Pilotos	54
7. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA OFDM CON MIMO MASIVO IMPLEMENTADO	56
8. SIMULACIÓN Y RESULTADOS	71
9. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS	81
9.1 Conclusiones.....	81

9.2 Líneas Futuras	83
10. SUMMARY OF THE PROJECT (IN ENGLISH).....	84
10.1 Introduction and Objectives	84
10.2 State of the Art.....	85
10.3 Social and Economical Values.....	86
10.4 Principles of OFDM.....	87
10.5 Principles of MIMO.....	88
10.6 Pilot Contamination	89
10.7 Development of a MIMO-OFDM System.....	90
10.8 Simulation and Results	91
10.9 Conclusion and Future Views.....	91
BIBLIOGRAFÍA	94

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Evolución de las Tecnologías de Com. Móviles [17]	11
Figura 2. Tráfico Móvil Global por Generación [23]	14
Figura 3. Lanzamiento por fases 3GPP [25]	15
Figura 4. Crecimiento del Tráfico Móvil Global por tipo de Dispositivo [23]	17
Figura 5. Crecimiento de Dispositivos Móviles por Año [23]	18
Figura 6. Modelo de una Comunicación Inalámbrica [31]	21
Figura 7. Diagrama Esquemático de la Siguiete Generación 5G de Redes Inalámbricas [33]	23
Figura 8. MIMO Masivo y Beamforming [33]	24
Figura 9. Espectro Electromagnético en Radiofrecuencias y otras Tecnologías [57]	28
Figura 10. Desarrollo del Plan Nacional 5G [55]	31
Figura 11. Esquemático MIMO Masivo de la Patente US20150092621 [62]	32
Figura 12. Potencial Económico del Internet de las Cosas por Tipos de Aplicación [63]	34
Figura 13. Espectro OFDM en frecuencia con una vs. con varias portadoras [68]	41
Figura 14: Representación gráfica de una señal OFDM en Tiempo y Frecuencia [70]	43
Figura 15: Modulador OFDM [87]	43
Figura 16: Demodulador OFDM [87]	44
Figura 17: Diagrama de Bloques Completo OFDM [71]	44
Figura 18: Inserción de Prefijo Cíclico en los símbolos OFDM [71]	46
Figura 19: Tipos de Configuraciones Multiantena [72]	47
Figura 20: Capacidad del Canal vs. SNR [73]	48
Figura 21: Análisis del Sistema SISO-MIMO [74]	49
Figura 22: Diversidad Espacial frente Multiplexado Espacial en Sistemas MIMO [75]	50
Figura 23: Sistema MIMO con Diversidad [75]	50
Figura 24: Sistema MIMO con Multiplexado Espacial [76]	51

Figura 25: Diagrama de un Transmisor MIMO-OFDM [72]	52
Figura 26: Diagrama de un Receptor MIMO-OFDM [72]	52
Figura 27: Escenario con MIMO Masivo [78]	53
Figura 28: Diagrama Terminal Interferente - Deseado en Celda [79]	54
Figura 29: Interferencia Producida por Terminal en Celda Adyacente [79]	55
Figura 30: Diagrama de Multiplexado Espacial [80]	57
Figura 31: Diagrama de Bloques del Transmisor	57
Figura 32: Esquema Complejo de la Modulación Q-PSK (o 4-PSK). [81]	58
Figura 33: Distribución de Señales Piloto en la Rejilla Tiempo/Frecuencia [82]	59
Figura 34: Esquema MIMO desde la Perspectiva del Canal [83]	60
Figura 35: Matriz Resultante de MIMO para Sistema 2x2 [83]	60
Figura 36: Diagrama de Bloques del Canal	61
Figura 37: Diagrama de Bloques del Receptor	62
Figura 38: Proceso de la Ecuación de forma Gráfica [84]	63
Figura 39: Red Celular con Diferentes Factores de Reuso [85]	65
Figura 40: Red Celular con una Celda Interferente	65
Figura 41: Red Celular con seis Celdas Interferentes	66
Figura 42: Red Celular con una Celda Interferente (con Secuencia Ortogonal)	66
Figura 43: Red Celular con dos Celdas Interferentes (con Secuencias Ortogonales del Mismo Tipo)	66
Figura 44: Red Celular con seis Celdas Interferentes (con Secuencias Ortogonales del Mismo Tipo)	67
Figura 45: Red Celular con dos Celdas Interferentes (con Secuencias Ortogonales de Distinto Tipo)	67
Figura 46: Red Celular con seis Celdas Interferentes (con Secuencias Ortogonales de Distinto Tipo)	68
Figura 47: Modelo Celular Hexagonal con Contaminación de Pilotos [86]	69

Figura 48: Red Celular con Celda Contigua Interferente y MS Interferente a Cierta Distancia _____	70
Figura 49: Curvas BER vs. SNR del Escenario 0 _____	71
Figura 50: Curvas MSE de la estimación del canal vs. SNR del Escenario 0 _____	72
Figura 51: Curvas BER vs. SNR del Escenario 1A _____	72
Figura 52: Curvas MSE de la estimación del canal vs. SNR del Escenario 1A _____	73
Figura 53: Curvas BER vs. SNR del Escenario 1B _____	73
Figura 54: Curvas MSE de la estimación del canal vs. SNR del Escenario 1B _____	74
Figura 55: Curvas BER vs. SNR del Escenario 2 _____	74
Figura 56: Curvas MSE de la estimación del canal vs. SNR del Escenario 2 _____	75
Figura 57: Curvas BER vs. SNR de la Comparativa de Escenarios 0 y 1A para CI=0.675	
Figura 58: Curvas BER vs. SNR de la Comparativa de Escenarios 0 y 1A para CI=0.376	
Figura 59: Curvas MSE de la estimación del canal vs. SNR de la Comparativa de Escenarios 0 y 1A para CI=0.6 _____	76
Figura 60: Curvas MSE de la estimación del canal vs. SNR de la Comparativa de Escenarios 0 y 1A para CI=0.3 _____	77
Figura 61: Curvas BER vs. SNR de la Comparativa de Escenarios 1B y 2 para CI=0.677	
Figura 62: Curvas BER vs. SNR de la Comparativa de Escenarios 1B y 2 para CI=0.378	
Figura 63: Curvas MSE de la estimación del canal vs. SNR de la Comparativa de Escenarios 1B y 2 para CI=0.6 _____	78
Figura 64: Curvas MSE de la estimación del canal vs. SNR de la Comparativa de Escenarios 1B y 2 para CI=0.3 _____	79
Figura 65: Applications of 5G Communication [33] _____	86

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2.1: COMPARACIÓN DE TECNOLOGÍAS DE COMUNICACIONES MÓVILES MODERNAS _____	19
Tabla 4.1: ENUMERACIÓN DE LOS COSTES DEL TFG CON PRECIOS _____	39
Tabla 4.2: ENUMERACIÓN DE LOS COSTES HUMANOS POR HORAS _____	40

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación y contexto del proyecto

Desde principios del siglo pasado hasta nuestros días la sociedad ha sufrido una evolución con crecimiento permanente llevado a cabo por importantes innovaciones en múltiples ámbitos de la tecnología, que están produciendo que evolucionemos como sociedad a pasos agigantados. Las tecnologías de la información han cambiado la manera en que nos comunicamos entre nosotros y con el entorno haciendo que nuestro día a día sea mucho más sencillo y estemos constantemente conectados con los servicios que necesitemos, disponiendo en cualquier momento de toda la información de manera instantánea. Las tecnologías que hacen esto posible tienen un impacto considerable en la sociedad moderna y están evolucionando de forma significativa ocupando un lugar muy importante en el desarrollo de las sociedades actuales.

Dentro de las tecnologías de la información tienen una parte fundamental las tecnologías de comunicaciones, donde tienen especial relevancia por su flexibilidad, portabilidad e implementación en infinidad de aplicaciones las comunicaciones móviles.

A diferencia de las comunicaciones cableadas, las comunicaciones inalámbricas ofrecen una serie de aplicaciones prácticas y servicios en los que la barrera física queda eliminada solventando el problema de la movilidad permitiendo una conectividad sin precedentes.

El uso práctico que tienen las tecnologías de comunicaciones móviles es tan amplio que gran parte de las empresas dedicadas a las comunicaciones enfocan sus productos a desarrollarlos como dispositivos móviles debido a la gran demanda y al crecimiento continuo de sus funcionalidades, especialmente para aplicaciones emergentes en transmisiones multimedia. De esta manera, esta tecnología tiene una gran repercusión en numerosos campos donde las ventajas que proporcionan frente a los sistemas cableados son notorias, sobre todo a la hora de la instalación, mantenimiento, materiales, espacio, coste, movilidad y dispersión de sus usuarios y reconfiguración de la red en caso de necesidad entre otras muchas ventajas.

Los dispositivos portátiles que tienen especial relevancia son los denominados teléfonos inteligentes (*Smartphones*) cuyo desarrollo tecnológico en funcionalidades es continuo y el volumen de dispositivos en la sociedad es cada vez mayor. Para finales del año 2020, tras un análisis de Cisco, se ha previsto que la cantidad total de dispositivos de comunicaciones alcance cerca de los 50 billones de dispositivos [1] por lo que el principal reto a partir de esa fecha será ofrecer una conectividad libre de errores dada la enorme cantidad de dispositivos que pueden ser expuestos a grandes interferencias.

Además, también hay multitud de dispositivos inalámbricos que, aunque no tengan la relevancia en volumen a día de hoy de los teléfonos inteligentes, hay que tenerlos en cuenta ya que aumentarán en cantidad considerable debida a la alta demanda en este

tipo de tecnologías y al incremento de inversiones en ellas [1] los ordenadores portátiles, los dispositivos vestibles o *wearables*, dispositivos del internet de las cosas (*IoT*), vehículos autónomos en desarrollo con conectividad inalámbrica (*V2I, Vehicle-to-Infrastructure*), dispositivos inalámbricos de las ciudades inteligentes (*Smartcities*), tales como semáforos inteligentes, medidores de tráfico, sistemas de comunicaciones intravehiculares (*V2V, Vehicle-to-Vehicle*)... son ejemplos de sistemas de comunicaciones de banda ancha celulares que formarán parte de los dispositivos de quinta generación (5G).

Todos estos dispositivos tienen algo en común, y es que necesitan un sistema inalámbrico de transmisión de información, que, al verse multiplicados y aumentar en grandes cantidades a un ritmo de desarrollo muy alto por sus innumerables aplicaciones prácticas, necesitan nuevos protocolos, redes y sistemas de transmisión rápidos y fiables. Hay una gran cantidad de problemas técnicos provocados mayoritariamente por los efectos del canal radio [2] (desvanecimientos de señal, interferencias provocadas por otros usuarios...) que tienen que superarse para ser capaces de permitir la coexistencia en redes heterogéneas y el correcto funcionamiento de estos dispositivos. Es necesario cumplir una serie de características para que esto sea posible, como el alcance de velocidades transmisión muy altas, baja latencia (*Round Trip Time*), robustez de las comunicaciones y disponibilidad de red.

El ritmo en el que se producen todos estos avances en las tecnologías de comunicaciones es tan alto y afectan de una manera tan directa a la sociedad que cada vez son demandados más dispositivos móviles que facilitan multitud de tareas, por lo que es de vital importancia estar a la altura del desarrollo tecnológico que esto implica dando lugar a la búsqueda de soluciones que hacen posible esta evolución.

1.2 Objetivos

Durante estos últimos años, las comunicaciones móviles para múltiples servicios han ido ocupando cada vez más espacio en el espectro radioeléctrico debido a la gran diversidad de dispositivos transmitiendo en radio-frecuencias (RF) y ha surgido, debido a las nuevas tecnologías emergentes de comunicaciones, la necesidad de transmitir mayores cantidades de información a una tasa de transmisión mucho más alta.

Para ser capaces de soportar tal cantidad de servicios móviles, como servicios de radiodifusión de televisión de alta calidad (*HDTV broadcasting*) o servicios de telefonía con gran cantidad de transmisión de datos (en sistemas de comunicaciones de banda ancha celulares de quinta generación, 5G), surgen técnicas para aprovechar al máximo el espectro radioeléctrico, ya que éste, es un recurso limitado.

Para mantener una eficiencia espectral alta, la técnica de modulación que reúne las mejores características es la Multiplexación por División Frecuencia Ortogonal, OFDM. Será la técnica de modulación usada en este proyecto ya que a su vez es una buena técnica para paliar uno de los efectos negativos del canal, la dispersión temporal

causada por la propagación multitrayecto (*multipath propagation*). Esta técnica consiste en transmitir información modulada sobre un número alto de subportadoras (*subcarriers*) que son multiplexadas en frecuencia generando lo que se denomina símbolo OFDM, formado por el solape de los subcanales que son ortogonales entre sí. Esta ortogonalidad da lugar a la alta eficiencia espectral buscada aparte de proporcionar ganancia en diversidad de frecuencia y mejorar el rendimiento de la capa física.

Otra de las técnicas que resulta muy atractiva para obtener soluciones en velocidad de transmisión de información en enlaces inalámbricos y, obtener la alta eficiencia espectral mencionada antes, es la combinación de la técnica OFDM con tecnologías de múltiples antenas en transmisión y en recepción (MIMO - *Multiple Input and Multiple Output*) [3]. Los sistemas de múltiples antenas MIMO ofrecen un aumento de la capacidad del canal además de diversidad espacial (mejora la fiabilidad) y multiplexación espacial (mejora la tasa de transmisión de bit) frente a los sistemas de transmisión SISO (*Single-Input and Single-Output*). Esta combinación MIMO-OFDM ofrece multitud de ventajas y soluciona de manera efectiva los problemas mencionados con anterioridad, permitiendo mejorar las prestaciones reduciendo el efecto de las interferencias, siendo así la técnica de transmisión inalámbrica conjunta usada en este proyecto.

Dentro de los objetivos de este trabajo, uno de ellos consiste en presentar ambas técnicas, diseñando un sistema de comunicaciones, dada la importancia para su aplicación en dispositivos móviles de quinta generación de comunicaciones móvil (5G), presentar su funcionalidad, ventajas y ofrecer una solución a los inconvenientes técnicos a los que se enfrentan. Se analizarán datos sobre la calidad de la transmisión sobre un canal simulando un entorno de comunicaciones MIMO-OFDM en el que se puede variar multitud de parámetros, entre ellos, el número de antenas transmisoras y receptoras, y ver el efecto que estos cambios producen.

MIMO es una técnica en la que se usan varias antenas en transmisión y recepción (por ejemplo: MIMO 4x4) para mejorar la calidad, capacidad, robustez y velocidad del enlace por lo que cabe esperar que si se aumenta notablemente el número de antenas en transmisión y recepción (por ejemplo: 16x64) se mejoran las prestaciones de dicho enlace. Este incremento de antenas en sistemas MIMO se denomina MIMO Masivo (*Massive MIMO*). Trata de una revolucionaria tecnología que tiene multitud de ventajas sobre MIMO estándar ya que incrementa su eficiencia espectral y energética notablemente [4]. A pesar de los beneficios que proporciona frente a MIMO surgen una serie de problemas a tratar específicos de MIMO Masivo que suponen un desafío para poder finalmente implementar esta tecnología y sacarle todo el potencial que ofrece, entre ellos están la contaminación de pilotos, el acoplado mutuo (*mutual coupling*) y la correlación espacial entre antenas [5].

En el proyecto serán analizados una serie de escenarios simulando un entorno avanzado de MIMO Masivo, a partir del sistema previo de MIMO-OFDM, en el que queda

reflejado el comportamiento de sus efectos, proponiendo posibles soluciones especialmente al problema de la contaminación de pilotos, que causa una mala estimación del canal dando lugar a un mal rendimiento.

La estimación del canal será un proceso clave ya que al estimarse muchos canales en MIMO Masivo se requieren secuencias de pilotos muy largas, lo que da lugar a pérdidas de tasa binaria. Para que no sean tan largas se reutilizan en celdas contiguas, lo que da lugar al problema de Contaminación de Pilotos.

Los escenarios simulan una red de celdas en las que cada una tiene una estación base con 64 antenas transmisoras/receptoras y 16 antenas/dispositivos móviles a ciertas distancias transmitiendo la información desde los dispositivos móviles hacia la estación base (*uplink*). Las celdas (con forma hexagonal) vecinas a la celda principal generarían interferencias en ésta pudiéndose visualizar los efectos del problema de contaminación de pilotos y las mejoras que se producen al aplicar la técnica del Reuso (*Reuse*).

Finalmente, en este proyecto se refleja el estado del arte, se analizarán las líneas futuras e investigaciones a realizar y se ayudará al lector a comprender el funcionamiento, la importancia y el gran potencial de estas tecnologías del campo de las comunicaciones móviles, que supondrá un cambio sin precedentes en las comunicaciones gracias a la infinidad de aplicaciones.

1.3 Organización de la memoria

La memoria del Trabajo de Fin de Grado está organizada en 10 capítulos desglosados a continuación:

En el capítulo uno nos encontramos con la introducción, donde se analizan los objetivos y se visualiza el contexto del trabajo para mostrar la motivación de la realización del como su idea y contexto.

En el siguiente capítulo, el capítulo dos, se expone el Estado del Arte (*State-of-The-Art*) cuyo fin y objetivo es desarrollar los conceptos y recopilar la información de otras investigaciones realizadas sobre el tema del TFG en sí. También es una forma de contextualizar al lector presentándole el rango de conocimientos acumulados sobre el estudio a realizar. En él se habla de los avances tecnológicos, de la taxonomía, de las generaciones de las tecnologías inalámbricas, tanto como lo que el futuro de esta tecnología depara y la presentación de las tecnologías emergentes. En la parte final del capítulo se desarrolla una breve explicación sobre las técnicas modernas de comunicaciones en la quinta generación (5G) y posteriormente se hace un resumen sobre los estudios previos de gran relevancia de MIMO Masivo realizados hasta la fecha.

En el desarrollo del tercer capítulo se presenta el marco regulador del proyecto, que se divide en tres secciones. Una de ellas es la legislación aplicable, en la que se habla del modelo legislativo actual específicamente para la tecnología de estudio. En la segunda

sección se exponen los diferentes estándares técnicos y en la tercera y última sección se da una idea de las aplicaciones y su implicación bajo la sujeción de la propiedad intelectual así como en la patentabilidad de esta tecnología.

El cuarto capítulo se centra en el impacto de esta tecnología en la sociedad y en la economía local y mundial cuyo entendimiento y contextualización es muy importante para entender el motivo de la creación y estudio de este TFG. En esta sección se presentará el impacto socio-económico y medioambiental abarcando multitud de variables y casos de uso especializado en cada sección, y el presupuesto de elaboración de este Trabajo de Fin de Grado mostrando un informe detallado de los costes materiales y personales.

El quinto capítulo sirve de forma introductoria a la técnica de modulación OFDM, básica para el desarrollo de la tecnología MIMO en este trabajo. Se presenta OFDM de manera sencilla y esquemática para poder entender su importancia en la implementación del sistema MIMO, conocimientos necesarios para la comprensión de este trabajo.

A lo largo del sexto capítulo se presentan en detalle los principios de MIMO Masivo, explicando de manera conceptual, esquemática y técnica sus principios y capacidades de aplicación. Se abre el capítulo explicando algunos aspectos claves y básicos sobre el concepto de Multi-Antena (MIMO). El capítulo continúa con la extensión de los principios de MIMO a una evolución a MIMO Masivo, caso de estudio y núcleo de este trabajo, para finalizar con uno de los problemas que más afecta a las transmisiones usando MIMO Masivo, la contaminación de pilotos.

A lo largo del séptimo capítulo se presenta el trabajo realizado, presentando cómo se ha llevado a cabo cada una de las secciones del sistema implementado. Para explicar este sistema se ha estructurado la explicación en diferentes apartados definiendo dos grandes bloques: transmisión y recepción. Dentro de los dos bloques se van definiendo las funciones usadas y su uso.

Las simulaciones y resultados ocupan el octavo capítulo, donde mediante una variación de los parámetros de simulación del entorno MIMO se obtienen numerosos resultados que generan diferentes efectos en la transmisión, donde se sacarán posteriormente las conclusiones (capítulo 9) y que ilustran la influencia de estos parámetros sobre las prestaciones del sistema. En este capítulo se detallan diferentes casos de transmisión para MIMO Masivo para poder ver el efecto de la contaminación de pilotos que tiene el uso de pilotos ortogonales de diferentes tipos en celdas de transmisión contiguas a una celda central de interés.

A modo de cierre, en el capítulo 9, se presentan las conclusiones sobre el trabajo realizado que se completa con una propuesta de líneas futuras de trabajo que se dejan abiertas para poder continuar con el estudio del mismo y mejorar sus inconvenientes.

Finalmente, se concluye con el listado de referencias y bibliografía utilizada.

2. ESTADO DEL ARTE

Los avances en las tecnologías de comunicaciones móviles evolucionan a un ritmo imparables, con un desarrollo frenético de productos de vanguardia en los que cada vez se fijan más las industrias emergentes, y donde las industrias actuales hacen especial hincapié y destinan grandes recursos económicos en adaptarse a éstas dado el potencial que ofrecen. Facilitar la movilidad a los usuarios, dar mejores y más variados servicios multimedia, reforzar la eficiencia en las empresas, dar servicios de atención médica y de seguridad rápidos y eficientes, mejorar el tráfico y el medioambiente a través de dispositivos *IoT* son algunos ejemplos de los impactos de las aplicaciones de los dispositivos de comunicaciones móviles de quinta generación (5G).

Para conseguir que estos avances sean tangibles, surgen desarrollos que incentivan la investigación e innovación tecnológica a partir de la demanda de servicios multimedia con alta velocidad de transmisión de datos y alta eficiencia espectral que en la actualidad con la cuarta generación (4G) es difícil de conseguir aún soportando tasas de transmisión de servicio más altas (100 Mbits/s) que los sistemas tradicionales de tercera generación (3G). Se ha vuelto crucial incorporar avances en la capa física en los sistemas de comunicaciones móviles, avances que se llevan a cabo y se hacen tangibles en los dispositivos de comunicaciones de 5G como lo es la técnica MIMO [6] o técnicas más avanzadas, como la estudiada en este trabajo, MIMO Masivo.

En esta sección del trabajo se va a presentar la situación de la tecnología de comunicaciones móviles desde su base con 1G y GSM hasta el estado de estas tecnologías en la actualidad con una visión al futuro en 5G incluyendo un estudio de las investigaciones hechas recientemente con el objetivo de recopilar los conocimientos más relevantes y trascendentes sobre la situación de la tecnología a desarrollar en este trabajo, las técnicas de comunicaciones radio para 5G con la aplicación de MIMO Masivo combinado con OFDM.

2.1 Evolución de las Comunicaciones Móviles y Taxonomía

Las redes de comunicaciones móviles están formadas esencialmente por dos tipos de elementos: los dispositivos móviles y las estaciones base en infraestructuras, y por dos tipos de redes: las redes celulares, las cuales se encargan de la transmisión de voz y datos y las redes locales y de área local, en el que se incluyen tecnologías como WiFi o Bluetooth® [7].

Las primeras comunicaciones sin necesidad de usar cables para que se hiciera efectiva la transmisión se realizaron a finales del siglo XIX, y a principios del siglo pasado empezaron a usarse para diversas aplicaciones, como las comunicaciones con los barcos en alta mar usando tecnología AM. En este mismo periodo comenzó la retransmisión por radio AM y los departamentos de policía empezaban a equipar esta tecnología. Por aquel entonces, las transmisiones tenían longitudes de onda de entre 70 y 35 metros por lo que las antenas que se equipaban eran demasiado grandes para otro tipo de

aplicaciones debido a las frecuencias tan bajas que se usaban [7]. El salto que se produce tecnológicamente en este campo durante el siglo pasado es de gran magnitud, lo que lleva a reducir el tamaño de los sistemas de transmisión y recepción al aumentar la frecuencia siendo más accesibles a la población, como telefonía móvil, produciendo una gran evolución tecnológica desde entonces.

Se ha vuelto común el hecho de clasificar los grandes grupos de tecnologías de comunicaciones por generaciones. Cada generación se compone de tecnologías que contienen características similares donde el enfoque, principalmente, está orientado a servicios de telefonía móvil [8].

Primera Generación (1G)

La primera generación, o 1G, se corresponde con los primeros sistemas de comunicaciones móviles basados en servicios de telefonía donde las características de los sistemas están especialmente basadas en la transmisión inalámbrica por voz de forma analógica.

Esta generación se basa en las comunicaciones analógicas cuyo ancho de banda para el canal es de 30kHz. La primera tecnología de comunicaciones de primera generación fue el AMPS (*Advanced Mobile Phone Services*) [9], aunque el primer sistema de telefonía fue el MTS (*Mobile Telephone Service*) que funcionaba a una frecuencia de 40 MHz con 11 canales. Posteriormente se implementó una versión mejorada de este sistema llamado IMTS (*Improved Mobile Telephone Service*). Al ser un servicio analógico, la transmisión de datos era ineficiente y tenía una tasa binaria muy baja [10].

Segunda Generación (2G)

En la segunda generación, o 2G, se comienza a orientar la transmisión de voz hacia lo digital, en vez de transmisiones analógicas, y se comienzan a dar los primeros pasos, principalmente en oficinas e instituciones, en servicios orientados a transmisión de datos a través de Redes de Área Amplia (WAN) y Redes de Área Local (LAN) para ordenadores.

Los inconvenientes de 1G eran la ineficiencia y la utilización de señales de voz analógica y en 2G se solucionan notablemente usando transmisión de señales digitales. El rango de frecuencias utilizado es de 900 MHz a 1800 MHz (diferente en EE.UU.) [11] y surgen nuevas aplicaciones como los SMS y MMS. La velocidad de transmisión de datos en 2G es solamente 64 kbps en la que se aplican dos técnicas de transmisión novedosas: TDMA (*Time Division Multiple Access*), técnica en la que la información se transmite con multiplexación temporal, y CDMA (*Code Division Multiple Access*), técnica de transmisión en la que la información se transmite con códigos ortogonales [10].

Estas dos técnicas son de acceso al medio, o también llamado multiplexado, cuyo objetivo es básicamente controlar y repartir a los usuarios el uso del canal de comunicación, para que la transmisión se haga efectiva cuando hay otras comunicaciones simultáneas sin que ocurra solape espectral dando lugar a interferencias que imposibilitarían la comunicación. En definitiva, son técnicas para gestionar los recursos, ya que el rango de frecuencias que tenemos está acotado debido a las limitaciones del espectro electromagnético.

Este concepto es importante ya que estas son las primeras técnicas de transmisión que surgen, por lo que sirven como base a técnicas más avanzadas que se verán posteriormente en este trabajo como OFDM, MIMO y MIMO Masivo en las que se mejorarán aspectos como la calidad del servicio y probabilidades de error de bit.

Otra de las tecnologías clave de la segunda generación es el GSM, Sistema Global para Comunicaciones Móviles (*Global System for Mobile Communications*), se convierte en el sistema más famoso y usado de transmisión de voz, ya que su despliegue fue mundial, e incluso era capaz de soportar ciertas transmisiones de datos a baja velocidad. Se diseñó para la transmisión de voz principalmente, por lo que la transmisión de datos era lenta, en la que se alcanzaban en enlace ascendente y en enlace descendente velocidades de 13 kbps para transmisiones de voz y de 270 kbps como máximo en transmisiones de datos [13]. Posteriormente se mejoró GSM permitiendo enviar los datos a través de paquetes triplicando la tasa de transmisión para los SMS o MMS; esta mejora se denominó GPRS (*General Packet Radio Service*).

La técnica de modulación que se usó para codificar los datos fue la modulación GMSK (*Gaussian Minimum Shift Keying*). Esta técnica de modulación se basa en no tener discontinuidades de fase, lo que se traduce en una mejora respecto a la eficiencia en el uso del espectro electromagnético. El ancho de banda usado en GSM es de 200 kHz lo que permite el uso simultáneo de 8 usuarios en el canal [10].

GSM se implementó en Europa usando las frecuencias de subida de 890-915 MHz y de bajada en sentido descendente 935-960 MHz y se denominó GSM 900. Las versiones posteriores de GSM se encuentran en las bandas de 1800 MHz y 1900 MHz [12]. Hoy en día se trata del sistema de telecomunicaciones móviles más exitoso ya que está implementado en más de 193 países.

La tecnología GSM dio lugar al uso de la tarjeta SIM, producto que, a día de hoy, sigue en uso por los dispositivos móviles que requieren de transmisiones de voz y datos. La tarjeta SIM sirve como modo de identificación del dispositivo y contiene información importante sobre parámetros de redes. Para el despliegue del 5G, se está llevando a cabo la implementación de tarjetas SIM virtuales (*eSIM*) que identifiquen al usuario y al dispositivo sin necesidad de tarjeta física, ya que la cantidad de dispositivos de tipo *wearable* e *IoT* tendrán un volumen mucho más alto que en la actualidad y su uso será poco práctico.

Tercera Generación (3G)

La tercera generación, o 3G, consiste básicamente en la integración de servicios orientados para la transmisión de datos en sistemas telefónicos celulares debido a la alta demanda de este tipo de transmisiones multimedia y al incremento de tráfico.

Esta nueva generación surge a partir de la necesidad de tasas de transmisión más altas ya que los servicios que demandaba la sociedad requerían el transporte de grandes cantidades de información. La tercera generación fue revolucionaria ya que disminuyó la brecha de información al comienzo del nuevo milenio [14].

Para alcanzar el objetivo de mayores tasas de transmisión se mejoraron las técnicas de GPRS cuya principal mejora es la velocidad permitiendo alcanzar velocidades de 384 kbps de media. Esta tecnología se denominó EDGE (*Enhanced Data Rates for GPRS*) y supuso la posibilidad de navegar por internet en páginas web con cierto peso y usar el correo electrónico de manera fluida con un manejo de archivos adjuntos de gran tamaño. EDGE actuó como un puente entre 2G y 3G [14]. Para EDGE la técnica de modulación cambia, se usará la técnica de modulación de fase (8PSK) la cual permite tasas de transmisión mucho más altas que GMSK usadas en GSM y se adapta automáticamente a las condiciones del canal, teniendo las mejores condiciones y transferencias de 574 kbps cuando los dispositivos están cerca de las estaciones base [15]. A diferencia del único bit por símbolo usado en GPRS por la modulación GMSK, en 8PSK se usan 3 bits por símbolo lo que permite triplicar la tasa de transferencia. A veces, la tecnología EDGE se clasifica en una generación aparte de 3G, denominada 2.5G, al ser una tecnología intermedia entre ambas generaciones.

Después de que EDGE se quedara corto en especificaciones se mejoró de manera notable y su evolución pasó a llamarse *EDGE Evolution*. El motivo de esta mejora fue garantizar para el futuro una competitividad de la tecnología de 2G que más demanda estaba teniendo. A nivel técnico las mejoras fueron: el uso de portadora dual del enlace descendente, modulaciones de orden superior (16QAM y 32QAM) lo que se traduce en un incremento de la velocidad de símbolo, diversidad en la recepción y mejoras en latencia [16].

EDGE Evolution supuso la consolidación del 3G, al principio de su implementación, las velocidades máximas de transmisión en enlace descendente alcanzaban los 2 Mbps pero poco después surgieron nuevos avances que hizo que las velocidades de transmisión aumentaran considerablemente alcanzando los 14 Mbps en las mejores condiciones a través de técnicas más avanzadas como HSPA (*High Speed Downlink Packet Access*). Normalmente, de media comenzó con tasas de 3,6 Mbps y posteriormente de 8 Mbps lo que suponía un avance en el que aplicaciones como las video llamadas se hacían posibles. Por otro lado, si el usuario transmitía voz, las velocidades de transmisión bajaban y cuando se necesitaba una tasa más alta se incrementaba automáticamente a medida de las necesidades [10], teniendo en cuenta que el ancho de banda del canal que

está conectado a una misma estación base está compartido por todos los usuarios conectados a esa estación base. Se desarrolló el Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles UMTS, (*Universal Mobile Telecommunication System*), que fue la tecnología que sustituyó a GSM, que junto con las técnicas HSPA y HSPA+ fueron las claves para que 3G tuviera conexiones rápidas y bastante resistente frente a interferencias

El despliegue de la tercera generación, a día de hoy, es muy amplio, cubre multitud de zonas y es fácilmente accesible. En España, las frecuencias dedicadas a 3G son la banda de los 900 MHz y 2100 MHz, en el resto del mundo el rango de frecuencias de 3G suele ir entre los 850 MHz y 2100 MHz.

Cuarta Generación (4G)

La cuarta generación se centra básicamente en superar, por mucho, las tasas de transmisión de 3G, reducir la latencia y permitir una movilidad mucho más amplia manteniendo tasas de transmisión altas durante la movilidad. La cuarta generación comienza con el denominado LTE (*Long Term Evolution*), lo que significa que es una tecnología que se diseña para ser duradera y competente en el tiempo.

LTE es desarrollado por 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*), la misma organización que desarrolló GSM y UMTS, y significa un puente entre la tercera generación y la cuarta, siendo aún, considerado parte de 3G por la ITU (*International Telecommunications Union*) aunque a modo de marketing se estableció como 4G-LTE [20].

El cambio generacional llegó realmente con LTE-A (*LTE-Advanced*) en el que se cumplen las velocidades de transmisión mínimas para poder ser considerado 4G. En la siguiente figura se puede observar fácilmente este cambio generacional tanto como los de generaciones previas sin contar la primera generación, ya que ésta, se basaba únicamente en transmisiones de voz analógicas en desuso hoy en día.

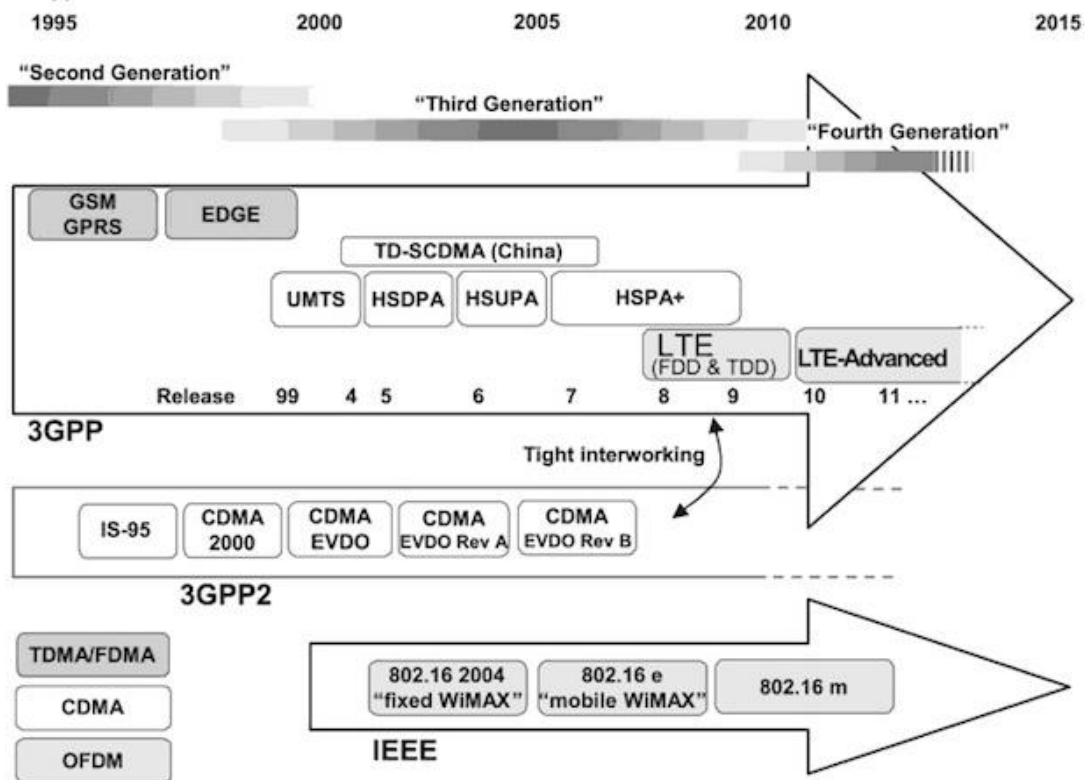


Figura 1. Evolución de las Tecnologías de Com. Móviles [17]

En el año 2009 (en España en 2011) se lanza LTE, que es un nuevo estándar de comunicaciones, como lo son GSM (2G) y UMTS (3G). Uno de sus objetivos, aparte de volver a ser una generación en la que se mejora la tasa de transmisión y reduce la latencia, es el ser capaz de hacer un despliegue de esta tecnología que sea poco costoso, fácil de implementar y que contenga un amplio grado de escalabilidad. Las frecuencias usadas en LTE se clasifican en bandas de un total de 63, las bandas de frecuencia usadas en España son: 800 MHz (utilizada para televisión hasta el 2015), 1800 MHz y 2600 MHz [18].

En comparación con las velocidades de 3G, en 4G las velocidades de transmisión de información son entre 5 y 10 veces más rápidas. Según la UIC (Unión Internacional de Comunicaciones) las velocidades de 4G deben estar en 100 Mbps para dispositivos en movimiento y 1 Gbps cuando están en reposo. Estas conexiones a velocidades tan altas son equivalentes a las del ADSL cableado [14], lo que supuso una auténtica evolución ya que hasta el momento no se habían igualado las comunicaciones inalámbricas a las cableadas permitiendo una transferencia de contenidos entre dispositivos nunca visto antes, en el que el contenido principal es la visualización de vídeos y multimedia de alta calidad, así como poder realizar transmisiones en directo y vídeo llamadas de alta calidad.

Una de las características de LTE es que es diseñado para redes con sistemas basados únicamente en envío de paquetes (conmutación de paquetes) y es capaz de coexistir con

los sistemas de generaciones pasadas, UMTS y GSM, para prolongar la vida útil de estos ya que LTE se trata de un sistema diferente (sólo gestiona transferencias a través de IP) con mayor eficiencia espectral e incluso con menor coste que 3G, cosa que beneficia a las empresas y los operadores de telecomunicaciones a la hora de fabricar los productos y de desplegar la nueva red LTE. Otra de las principales características de LTE consiste en el uso del tipo de duplexación al ser compatibles con ambos estándares TDD (*Time Division Duplex*) y FDD (*Frequency Division Duplex*) lo que permite una gran flexibilidad en el uso de dispositivos 4G con diferentes tipos de duplexación evitando la fragmentación de los dispositivos móviles.

Para mejorar el rendimiento de la capa física en la tecnología 4G se usa la técnica de modulación estudiada en este trabajo, concretamente en el capítulo 5, OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) ya que proporciona una alta eficiencia espectral, proporciona una ganancia en diversidad de frecuencia, mejora el rendimiento de la capa física y es totalmente compatible con el uso de la técnica, estudiada en el capítulo 6, de múltiples antenas MIMO. Los sistemas de 4G/LTE usan conjuntamente estas dos técnicas MIMO-OFDM en la capa física, donde en las generaciones previas se usa un sistema SISO (*Single-Input and Single-Output*).

Mientras OFDM convierte un canal selectivo en frecuencia con desvanecimiento de señal en uno con desvanecimiento plano o *flat fading*, MIMO ayuda a incrementar la capacidad del canal y la tasa de transmisión [19]. Los sistemas de LTE usan una configuración MIMO 2x2, dos antenas transmisoras y dos antenas receptoras, lo que da lugar a velocidades de 173 Mbps en orden descendente y a 86 Mbps en orden ascendente, pero si la configuración usada es de 4x4 las velocidades pueden llegar a los 300 Mbps; los sistemas más avanzados de LTE usan esta configuración.

Posteriormente, se mejoró la red LTE pasando a LTE *Advanced*, que permite incrementar la tasa de transmisión obteniendo transmisiones en enlace descendente cercanas a los 900 Mbps con valores de latencia tan bajos como 10ms, en casos muy favorables para la transmisión [18]. Con estas cifras, LTE *Advanced*, cumple los estándares en velocidad que la ITU fijó para la cuarta generación.

A día de hoy, España se encuentra entre los 15 países con mejor conexión 4G del mundo, basado en factores como la tasa de transferencia de datos y la cobertura por zonas. Es un dato importante ya que la densidad de superficie de España es mucho mayor que la de los países en cabeza [21].

Quinta Generación (5G)

Para la quinta generación, que aún está en fase de desarrollo, se esperan alcanzar velocidades de transmisión que se equiparan a los de las mejores redes de fibra óptica existentes, pero no sólo se pretende dar un salto generacional en cuanto a velocidad de conexión, sino que supondrá una verdadera evolución a nivel tecnológico y social ya que con las mejoras en velocidad, latencia y fiabilidad de las transmisiones surgen

nuevas aplicaciones que, con la tecnología y la generación actual, no son posibles de implementar por las limitaciones prácticas de estos parámetros.

Las diversas asociaciones de estandarización (GSMA, NGMN, 3GPP) establecieron que los requisitos a cumplir por la red para que se pueda considerar 5G es tener tasas de transmisión superiores a 1 Gbps y, quizás lo más importante, tener una latencia de 1ms como máximo (a diferencia de los 10ms, en el mejor de los casos, de las redes 4G actuales); también son requisitos la interoperabilidad entre tecnologías inalámbricas diferentes, alta fiabilidad del enlace radio y alta calidad de la señal. La diferencia en tasas de transmisión con los sistemas 4G actuales es de 30 veces mayor en 5G y en cuanto a la latencia unas 20 veces menor.

Si se cumplen estos requisitos, el potencial que tendrían los dispositivos de comunicaciones móviles tiende a ser inmenso. Las velocidades de transmisión tan altas, la latencia prácticamente inexistente, la eficiencia espectral y la reducción del uso de energía supondrían la aparición de infinidad de aplicaciones que en la actualidad no serían posibles.

El alcance de tasas tan altas parece un objetivo alcanzable ya que con los medios cableados, como la fibra óptica, se han obtenido velocidades superiores a las establecidas por los requisitos, incluso se han logrado obtener velocidades de 7,5 Gbps (en estacionario) y 1.2 Gbps de media (en movimiento con velocidades de 130km/h) en una transmisión por comunicación móvil ininterrumpida de la mano de Samsung [26].

Estos requisitos no están solamente enfocados a navegar y a obtener servicios multimedia de manera más rápida en teléfonos inteligentes o portátiles y tablets, sino que se enfocan a ser capaces de proporcionar servicio a los dispositivos del llamado *IoT* (*Internet of Things*), Internet de las Cosas, cuyo crecimiento es exponencial [27].

También es exponencial el crecimiento de transmisión de información desde que se establecieron los sistemas de comunicaciones digitales en la segunda generación. En la figura 2 se puede observar el tráfico global de datos móviles generados en cada una de las generaciones estudiadas hasta el momento, por año, incluyendo una estimación hasta el año 2021 con la llegada del 5G.

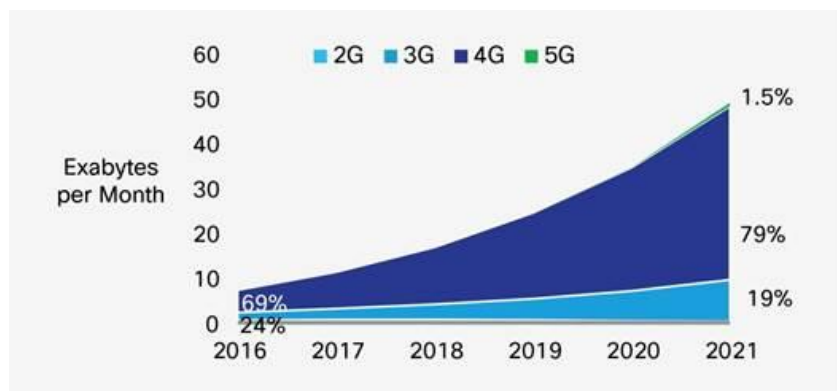


Figura 2. Tráfico Móvil Global por Generación [23]

El crecimiento de tráfico de datos estimado para el 2021 es prácticamente tres veces mayor que en la actualidad por lo que cumplir los requisitos para que una red sea capaz de soportar tal cantidad de datos es uno de los mayores retos del 5G. Hoy en día, las anteriores generaciones (3G y 4G) están desplegadas en gran parte del mundo, ofreciendo servicios principalmente de voz y de conexión a internet a gran velocidad [22].

El organismo que estandarizó las redes UMTS (3G) y LTE (4G), 3GPP, es el mismo encargado de estandarizar la quinta generación a nivel mundial cuyo lanzamiento de la primera etapa (Release 15) estaba previsto para mediados de este año 2018 en la que se fijaba la estandarización final de la quinta generación. La llamada "Release 15" es la primera fase para establecer la siguiente generación, el 5G.

En febrero de este mismo año, 2018, se realizó en España de la mano de Vodafone y Huawei la primera llamada 5G en el mundo según el último estándar experimental aprobado en diciembre de 2017 por la NSA (*Non Stand Alone*), que demuestra un gran nivel de madurez en el desarrollo del 5G sobre el estándar previo aprobado por 3GPP. La llamada se realizó desde Castelldefels (Barcelona) a Madrid utilizando el espectro de frecuencia de 3,7 GHz con equipos de *Radio Access Network (RAN)* de Huawei.

En la figura 3 se puede observar en qué punto estamos en la actualidad y los lanzamientos previstos por etapas para alcanzar finalmente la plenitud de la quinta generación. Según 3GPP, los primeros dispositivos comerciales y redes capaces de soportar 5G comenzarán a finales del 2019, comenzando el despliegue para su expansión y la adquisición de frecuencias del espectro a partir del año 2020 [24].

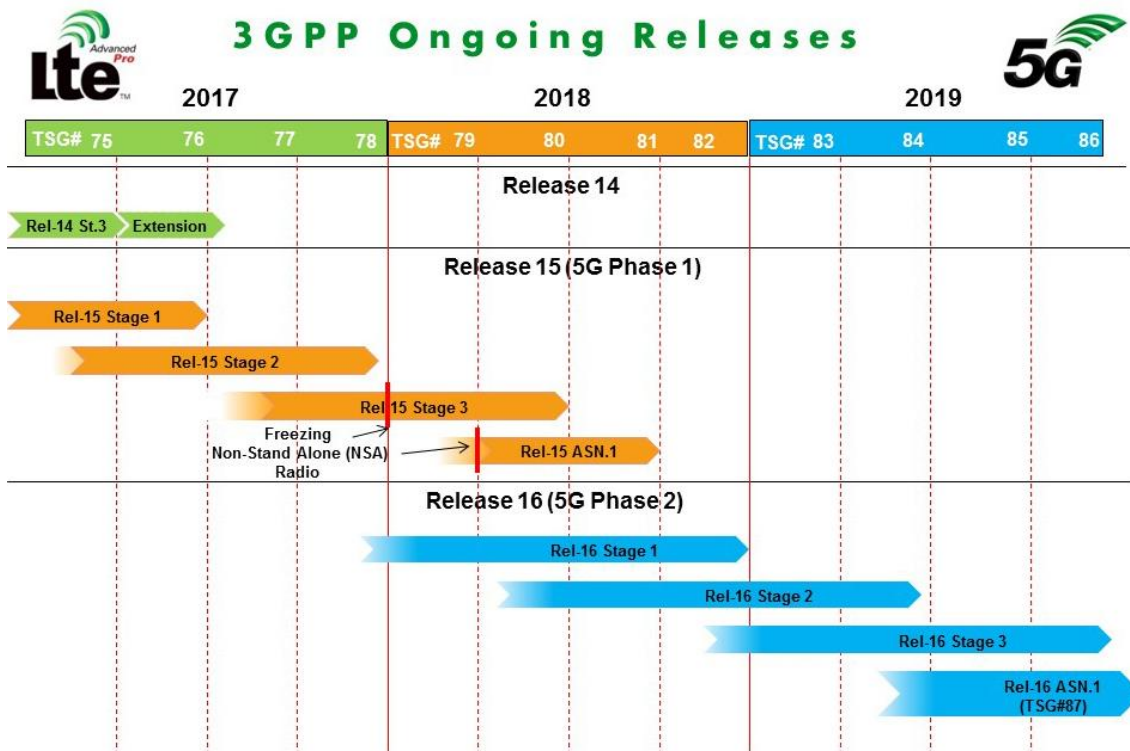


Figura 3. Lanzamiento por fases 3GPP [25]

Las frecuencias con las que se daría servicio a las redes de quinta generación son de vital importancia ya que dependiendo de la longitud de onda con la que se propaga tienen unas u otras características. Cuanto más bajas son las frecuencias mejor se propagan en interiores, de ahí al uso de la banda de los 800 MHz establecida para 4G en la que en España se usaba para la Televisión Digital Terrestre (TDT) y finalmente se acabó cediendo para el uso en LTE. No sólo mejora el uso en interiores sino que la latencia es mucho menor, que es uno de los objetivos a alcanzar en 5G. La banda de los 700 MHz es una de las bandas más interesantes para realizar el despliegue en las redes 5G ya que cumple con las características necesarias y podría estar disponible en un espectro que hoy en día está muy saturado por los numerosos servicios inalámbricos que se ofrecen [24].

2.2 Futuro y Tecnologías Emergentes

Aunque hoy en día el producto que consume el mayor volumen de tráfico de datos en la sociedad es el teléfono inteligente, donde actualmente es el principal mercado de negocio en el sector, con la llegada del 5G y el desarrollo de nuevos productos capaces de generar nuevas aplicaciones, las posibilidades de negocio se extenderán más allá de los dispositivos a los que estamos acostumbrados.

Ejemplos de estas tecnologías emergentes son los dispositivos del Internet de las Cosas, *IoT*. Pueden ser desde coches con conducción autónoma, drones de reparto autónomo con mecanismos anticolidión y dispositivos que hacen posible las Ciudades Inteligentes

(*Smart Cities*), hasta dispositivos de uso cotidiano como medidores de constantes para monitorizar la salud de pacientes de forma inalámbrica, dispositivos domésticos de uso diario en Casas Inteligentes (*Smart Houses*) como sensores de control para jardines, dispositivos de seguridad y localización... Este tipo de dispositivos no serían posible sin el establecimiento de las redes de sensores, WSN (*Wireless Sensor Networks*), donde se trata de nuevas tecnologías que forman parte de las "consecuencias" del despliegue del 5G.

De los ejemplos anteriores se pueden extraer grandes grupos de actuación, donde se pueden implementar los productos con las nuevas aplicaciones que traerán las tecnologías de 5G entre los que se encuentran las casas inteligentes, la movilidad inteligente/autónoma, las ciudades inteligentes conectadas, entretenimiento y seguridad entre otras. Todos estos grupos necesitan varios elementos vitales para poder ser llevados a cabo: velocidad en el enlace inalámbrico, latencia muy baja, gran fiabilidad en la conexión. Las técnicas usadas en la quinta generación tienen que ser capaces de cumplir estos requisitos por lo que teniendo un enfoque sólo en el enlace físico las técnicas de MIMO-OFDM (usado en la actualidad para LTE) y MIMO Masivo (en fase de desarrollo) pueden parecer las soluciones; se estudiará más adelante.

Uno de los puntos más críticos para poder ver el potencial de estas tecnologías y la importancia de cumplir los requisitos de 5G es en la seguridad para la movilidad conectada. Para las aplicaciones en las que la conectividad y rapidez de actuación sea un aspecto clave para la seguridad del usuario/usuarios, los sistemas y las redes tienen que tener una fiabilidad muy alta.

Un ejemplo de movilidad conectada donde se está invirtiendo e innovando mucho estos últimos meses son los coches autónomos. La rapidez de respuesta frente una situación de emergencia en la vía tiene que ser extremadamente rápida para evitar accidentes y garantizar la seguridad de los pasajeros y de terceros, de ahí que la latencia en las comunicaciones para estas aplicaciones tenga que ser no superior a 1ms y las tasas de transmisión de información tan altas.

Otro ejemplo de tecnología emergente en el que el punto crítico es la seguridad, por lo que el cumplimiento de los requisitos de 5G es de vital importancia, son los "robots cirujanos". El robot se encargaría de replicar los movimientos de un cirujano experto desde otro lugar del mundo por lo que la precisión en sus movimientos y el retraso prácticamente nulo en respuesta son necesarios para poder realizar a cabo tareas de este tipo con seguridad [27].

Aunque todos estos ejemplos de aplicaciones con el 5G parezcan estar aún fuera de nuestro alcance, en un futuro cercano serán posibles, aunque aún se tiene la necesidad de terminar de establecer una red 4G fiable y robusta extendida a lo largo de la geografía en el que el aprendizaje realizado en el despliegue de infraestructura de 4G/LTE sirva a modo de prueba para las siguientes redes en 5G. De esta manera, nos

sirve de aprendizaje para ver si los requisitos de LTE se cumplen en la práctica, y si no son cumplidos se deberá realizar una evaluación sobre si los desarrollos en redes 5G son dados a reducir el espacio entre la implementación comercial y los requisitos [22].

Según CISCO, para el año 2021, una conexión de la red 5G generará 4,7 veces más tráfico que las redes 4G y que prácticamente tres cuartos de todos los dispositivos conectados a la red serán dispositivos "inteligentes", exactamente 74,7% de los dispositivos móviles serán "inteligentes", el 36,7% más que en el año 2016. También es importante tener en cuenta la cantidad de información transmitida estimada para el 2021, pues las tabletas y ordenadores portátiles generarán 8 GB de tráfico al mes frente a los 3,4 GB al mes de media en el 2016. Los teléfonos móviles generarán 6,8 GB de tráfico frente los 1,6 GB al mes de media en el 2016. En la figura 4 se puede observar que el crecimiento de tráfico (en exabytes por mes) clasificado por tipos de dispositivos móviles es exponencial, donde un 86% del tráfico es generado por *smartphones* [23].

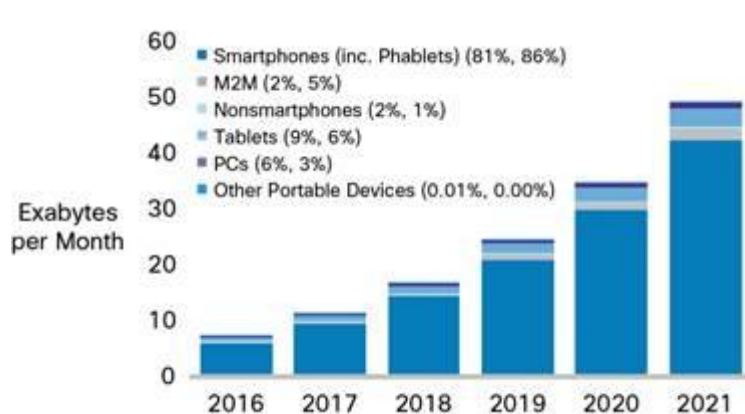


Figura 4. Crecimiento del Tráfico Móvil Global por tipo de Dispositivo [23]

Esta tendencia de crecimiento exponencial se ve repetida en el caso de la creación de nuevos tipos de dispositivos móviles que acceden a las redes de comunicaciones y contribuyen al uso del incremento de tráfico en la red. Cada año se introducen multitud de dispositivos diferentes con diferentes capacidades y aplicaciones en el mercado. Como se puede observar en la figura 5, la cantidad de estos dispositivos y de conexiones para el año 2021 será de 11,6 mil millones frente a los 8 mil millones actuales, continuando con un crecimiento exponencial del orden de los billones de productos con tecnología inalámbrica, que supondrán un 20% del tráfico IP total. Dividiendo estos dispositivos por tipos, para 2021 tendremos 8,3 mil millones para dispositivos móviles personales, de uso cotidiano (de los cuales cada persona tendrá de media 1,5 dispositivos), y 3,3 mil millones de conexiones máquina a máquina (*M2M*, *Machine-to-Machine*), como lo son los sistemas GPS y conexiones móviles en los vehículos, sistemas médicos móviles, etc. [23].

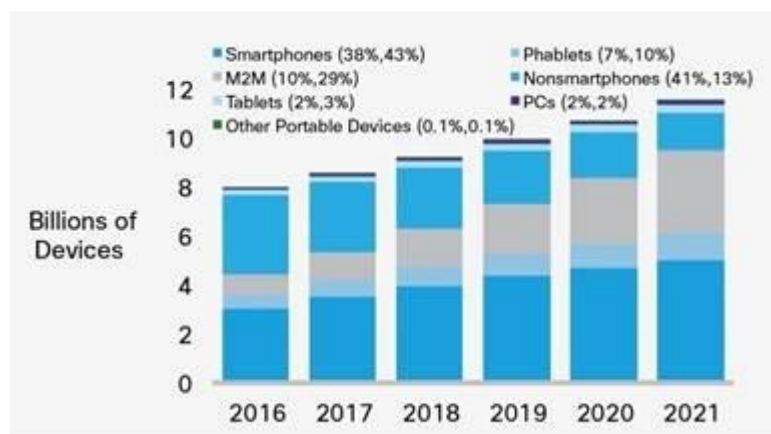


Figura 5. Crecimiento de Dispositivos Móviles por Año [23]

Los productos del Internet de las Cosas (*IoT*) forman un conjunto importante de dispositivos a tener en consideración, especialmente cuando su uso se realiza en las casas de forma privada y en los entornos urbanos de las ciudades inteligentes. Serán una gran distribución de dispositivos interconectados en el que se usarán los recursos de forma compartida y simultánea. Para este tipo de productos se necesitarán tecnologías que se diseñen para hacer frente a un número ilimitado de dispositivos eficientes energéticamente e interconectados y se debe hacer especial hincapié en la estandarización y en habilitar la coexistencia entre ellos.

Podemos clasificar los servicios y dispositivos de este tipo en varias tecnologías de comunicaciones:

- *NFC (Near Field Communication)*: Se caracteriza en el transporte y la movilidad con servicios como los pagos en establecimientos de forma inalámbrica.
- *Small Cells*: Son servicios que proporcionan interoperabilidad o robustez. La limitación principal es que necesitan un alto consumo de energía.
- *Redes LAN/MAN*: Un ejemplo de estas redes es el WiFi, cuyas limitaciones son la ausencia de controles inteligentes de las interferencias y su uso limitado entre dispositivos.
- *M2M (Machine-to-Machine)*: Puede conectar gran cantidad de dispositivos lo que desemboca en tecnologías de comunicación heterogéneas cumpliendo parte de los requisitos de 5G.
- *VLC (Visible Light Communication)*: Es un tipo de comunicación móvil mediante pulsos de luz que aún está en desarrollo. Tiene características muy favorables como la conectividad ilimitada, grandes tasas de velocidad de transmisión sin necesitar un despliegue complejo de infraestructura. Una de las limitaciones más importantes es la necesidad de tener una línea de visión directa entre transmisor y receptor.

- SDN & NFV (*Software-Defined Networking & Network Function Virtualization*): Estas tecnologías "virtuales" de conectividad ofrecen gran agilidad y flexibilidad para su implementación en dispositivos *IoT*. Con ella se puede monitorizar la comunicación punto a punto para mejorar la integración, la accesibilidad y la seguridad.

Estos sistemas de comunicaciones darán cobertura a las futuras redes 5G de una manera más abrupta que se da en la actualidad, algunas ni siquiera están implementadas y en uso actualmente.

En la siguiente tabla se presenta la taxonomía de las redes de telecomunicaciones modernas en la actualidad. Como lo son WiFi, WiMAX, LTE-A, Bluetooth, ZigBee...

TABLA 2.1: COMPARACIÓN DE TECNOLOGÍAS DE COMUNICACIONES MÓVILES MODERNAS

Tecnología	Estandar	Frecuencia	Rango	Velocidad	Topología	Ventajas	Inconvenientes
WiFi	IEEE 802.11	2.5 GHz	100m	1-54 Mbps	Estrella	Sin cables, movilidad	Gran atenuación, radio de servicio limitado
WiMAX	IEEE 802.16	3.5 GHz	50km	75 Mbps	Punto a punto	Alta velocidad, gran cobertura	Caro de instalar
LTE	3GPP	2.5, 5, 10 GHz	30km	30 (DL) 75 (UP) Mbps	Estrella	Alta eficiencia espectral	Coste elevado debido al uso de más antenas (MIMO)
LTE-A	3GPP	2.5, 5, 10, 15, 20 GHz	30km	1 Gb (DL) 500 Mbps (UL)	Punto a punto	Tasas altas de TX y RX	Alto coste
Bluetooth	IEEE 802.15.1	2.4GHz	1-100m	1 Mbps	Punto a punto	Barato, fácil de instalar	Rango corto de comunicaciones
ZigBee	IEEE 802.15.4	2.4 GHz	10-20m	250 kbps	Mesh	Alto ahorro de energía	Bajas tasas de transmisión
Z-Wave	-	900 MHz	100m	100kps	Estrella, cluster, mesh	Más simple que ZigBee	Carencia de seguridad
LoRaWAN	LoRa Alliance	867-869 MHz	2-5km	50 kbps	Estrella	Bajo consumo, barato	Rango corto de comunicaciones

Fuente: [1]

Como podemos observar, hay numerosos tipos de redes con diversas características que sirven para diferentes aplicaciones pero aún no hay una red que cumpla los requisitos de 5G para velocidad, distancia y latencia aunque, como hemos visto anteriormente, varias redes están en fase de desarrollo en la actualidad.

Específicamente, para los dispositivos del Internet de las Cosas, se tendrá una nueva solución en forma de red llamada WSN (*Wireless Sensor Network*), que darán cobertura a este tipo de dispositivos pequeños interconectados de forma inalámbrica formando otro gran bloque importante en la quinta generación.

La siguiente generación de los sistemas de comunicaciones usando Wireless Sensor Networks demandan que los dispositivos conectados a esa red tienen que ser capaces de funcionar de manera autónoma a la hora de realizar decisiones automáticamente y no sólo descargar y subir datos a una red. Las principales aplicaciones de este tipo de redes se encuentran en las ciudades inteligentes y en productos inalámbricos dedicados a la salud (*e-health*). Este tipo de aplicaciones necesitan soportar un gran número de usuarios que acceden a una plataforma multi-acceso como por ejemplo usuarios intentando solicitar información para uso personal, privado y agencias privadas o públicas que son responsables de dar alertas públicas a través de estos dispositivos. Uno de los principales objetivos de las redes WSN es conectar miles de millones de dispositivos y "objetos inteligentes" mientras interactúan con el mundo y con internet prediciendo estados usando a su vez técnicas de Inteligencia Artificial [29][30] .

El coste, el consumo, la escalabilidad y la integración pueden suponer las barreras más grandes para implementar este tipo de redes aunque se han producido grandes avances en la electrónica digital integrada que ha derivado en el desarrollo de sensores muy pequeños capaces de procesar datos y comunicarse de manera inalámbrica. Los sensores se comunican mediante transmisores radio estableciendo una comunicación directa con el receptor/es. La integración de estos dispositivos en las redes generan nuevos desafíos relacionados directamente con la calidad del servicio (*QoS*) necesitando nuevas técnicas de comunicaciones y de enrutamiento para ser capaces de dar servicio y cumplir con las altas demandas de capacidad en la red [31].

De esta forma, hemos podido observar los numerosos requisitos y desafíos que están por venir y que surge la necesidad de cumplirlos para dar lugar a la siguiente generación de comunicaciones móviles como es el 5G. Estos objetivos no sólo están en la búsqueda de términos de velocidad de transmisión más altas sino que abarca una gran cantidad de requisitos como lo son principalmente el coste, el consumo de energía, la escalabilidad, la coexistencia entre dispositivos heterogéneos y la latencia.

2.3 Técnicas Novedosas de Comunicación en 5G

Para que se establezcan los requisitos para desplegar las redes de quinta generación, aún se tienen que hacer múltiples avances en distintos campos como en las técnicas usadas para transmitir esta información a nivel físico, es decir, en las antenas. También en cómo se procesa y modula esa información para ser posteriormente tratada con el menor error posible y la máxima velocidad permitida.

Comenzando por lo más básico, una señal inalámbrica se transmite como una onda electromagnética la cual viaja por el espacio (llamado medio libre) por el que se propaga para ser posteriormente recibida por una/varias antena/s. En la Figura 6 se puede observar un modelo básico de una transmisión inalámbrica en la que el transmisor propaga una señal modulada en una señal portadora. El receptor recibe esta señal y se encarga de demodularla separando la señal portadora para extraer la información, y se puede modular una señal por frecuencia, amplitud o código [31].

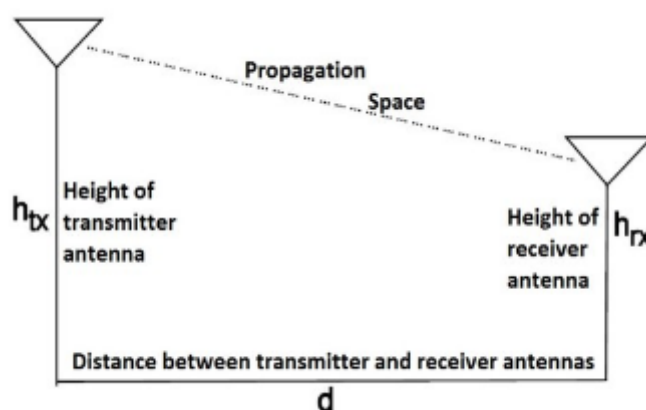


Figura 6. Modelo de una Comunicación Inalámbrica [31]

Las tecnologías de transmisión usan rangos diferentes de frecuencias, como hemos visto previamente con las generaciones que hay, y diferentes protocolos. Hay que tener en cuenta diferentes factores medioambientales y obstáculos que pueden producir distorsiones en las señales al ser enviadas. Pueden sufrir tres efectos principalmente: reflexión, refracción o difracción, por lo que surgen técnicas de modelado considerando parámetros de diseño como son las pérdidas de propagación, el retardo, ... [32].

El modelado de las pérdidas de propagación es de vital importancia ya que son las pérdidas que más afectan a una transmisión inalámbrica; estas pérdidas se consideran como la atenuación de la potencia de la señal causadas por la distancia. Otras causas además de la distancia pueden ser los obstáculos, transmisión sin línea de visión directa (*Line-Of-Sight*), condiciones meteorológicas o la movilidad del receptor/transmisor (usuario).

Después de estudiar las pérdidas de propagación, en la literatura hay varios sistemas de modelado, el más importante, el denominado Okumura Hata, que da valores muy cercanos a la realidad y aún hoy en día se usa como modelo para las redes de comunicaciones. Este modelo se considera válido para frecuencias entre 150 MHz y 1,5 GHz y para una distancia entre antenas mayor de 1 km. También existen más modelos para distintos rangos de frecuencia y distancia, como lo son Egli, Green-Obaidat o COST-231, cuyo rango de frecuencias es 1,5-2 GHz y la distancia 1-20 km. por lo que entra dentro de los estándares del 5G a estudiar [32].

Para el caso de *IoT*, las técnicas de comunicaciones a usar serán ligeramente distintas a las de los sistemas móviles comunes debido a sus características. La simultaneidad de comunicación entre estos dispositivos provoca que la identificación en la red de cada uno de los dispositivos tenga vital importancia, por ello, una de las posibles soluciones es usar *RFID (Radio Frequency Identification)* que se trata de una solución escalable para la identificación inalámbrica, la detección y el seguimiento. Básicamente un sistema RFID consiste en añadir una etiqueta y un lector junto con una antena transmisora y receptora existiendo dos tipos de etiquetas: pasiva y activa para identificar de este modo quien está realizando la transmisión para dar el servicio deseado [31].

En términos generalistas, para las redes 5G se termina de hablar del concepto básico de los sistemas celulares para estaciones base, yendo hacia una topología centrada en el dispositivo. En 5G se propone el uso de frecuencias mucho más altas de las de LTE para la comunicación hablando del rango de 20 GHz para arriba, considerándose *mm-wave* [33].

La tecnología celular de 5G tiene que funcionar con un gran número de usuarios, dispositivos y servicios por lo que técnicas muy avanzadas como el conformado de haz o *beamforming* espacial se tienen que usar para ganar cobertura y mitigar los efectos de las interferencias ya que el haz de la señal se enfoca directamente sobre el dispositivo interesado para establecer la comunicación (actuando como una antena direccional de forma virtual). Esta técnica junto con el uso de *mm-waves* sería una solución muy eficiente, con una latencia y un coste muy bajo. El uso del *beamforming* sería ideal usándolo de manera simultánea con las técnicas actuales aplicadas en LTE-A, como la son OFDM y MIMO pero incluyendo un gran número de antenas para multiplicar la capacidad del canal para ser capaces de soportar muchos usuarios (*Massive MIMO*).

Dado que las redes futuras tendrán que conectar diferentes nodos de manera muy próxima, estas redes 5G tan densas tendrán inevitablemente alta interferencia entre canales por lo que obliga a los ingenieros a diseñar antenas sectorizadas y direccionales dejando obsoletas las antenas omnidireccionales que se usan en la actualidad. A causa de esto, se vuelve necesario el uso de técnicas de acceso al medio nuevas como lo es SDMA (*Space Division Multiple Access*), cuya técnica se basa en el acceso espacial al medio [33].

Un ejemplo de todas las técnicas a usar para establecer las redes 5G junto con su multitud de nuevos servicios y dispositivos se puede observar en la siguiente figura, donde se representa mediante un esquema las técnicas de *beamforming*, *Massive MIMO*, *SDMA* y los múltiples servicios.

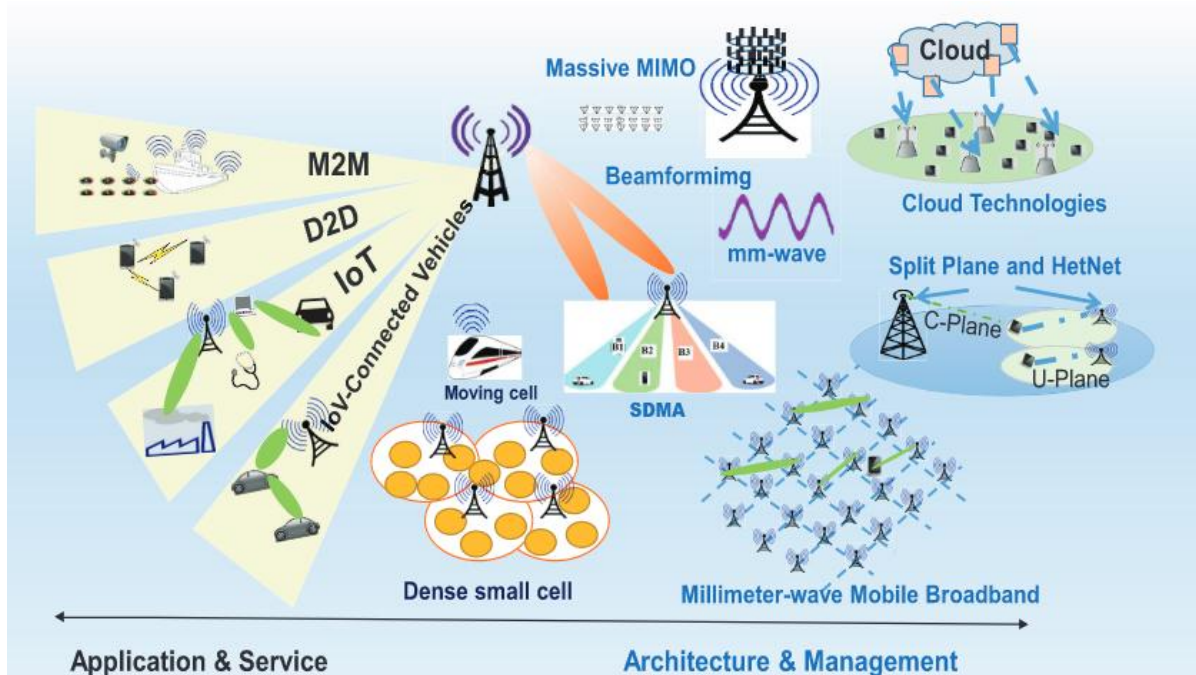


Figura 7. Diagrama Esquemático de la Siguiete Generación 5G de Redes Inalámbricas [33]

Para obtener una red 5G efectiva las antenas usadas tienen que tener un diseño matricial eficiente por lo que surge la necesidad de cambiar la interfaz aérea. El nuevo tipo de antena "inteligente" a usar tiene que tener capacidades de SDMA para optimizar la cobertura y reducir la potencia usada aún usando frecuencias mucho más altas de transmisión. La técnica estudiada en este trabajo, MIMO Masivo, junto con la técnica de *beamforming* proporciona a la estación base (BS) con técnicas de procesamiento lineales, un número muy alto de antenas, como se puede observar en la figura 8.

Todo el array de antenas es capaz de generar haces de señal verticales y horizontales de manera que esta direccionabilidad provoca un uso eficiente del espectro electromagnético. La superposición coherente de los frentes de onda es una de las claves de MIMO Masivo por lo que el multiplexado espacial en MIMO Masivo incrementa la capacidad del canal en la estación base siendo una de las tecnologías clave para el desarrollo de las redes de quinta generación [33]. En la simulación de MIMO Masivo usada en este trabajo se usa multiplexado espacial frente a la técnica de diversidad espacial.

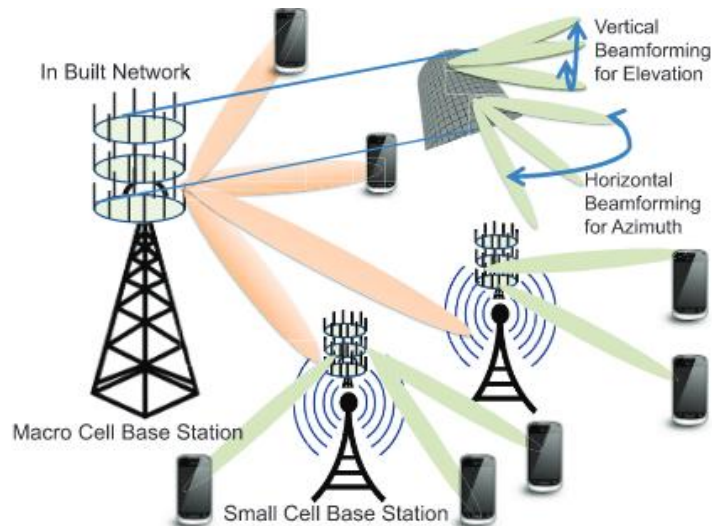


Figura 8. MIMO Masivo y Beamforming [33]

Las últimas tecnologías móviles incluyen las técnicas mencionadas y junto con OFDM son las que nos proporcionarían los requisitos necesarios para establecer las redes 5G y resolver los problemas y desafíos técnicos en materias de capacidad, latencia, consumo de energía, tasas de transmisión y eficiencia espectral.

2.4 Estudios Previos de MIMO Masivo

En esta sección del estado del arte se presentará la situación actual de MIMO Masivo observando los estudios previos junto con su problemática y desafíos a llevar a cabo. A través de la sección de "*Best Readings*" de la *IEEE Communications Society* podemos observar los temas de MIMO Masivo más punteros hasta la fecha y hacer un estudio de las investigaciones más detenidamente.

En el año 2016 se escribió el libro "*Fundamentals of Massive MIMO*" por investigadores pioneros en la materia como son T. Marzetta, E. G. Larsson, H. Yang y H. Q. Ngo. Este libro es la primera guía que muestra los principios físicos de MIMO Masivo que, sin entrar en excesivo detalle sobre procesamiento estadístico de la señal y las comunicaciones, guía al lector a través de los principales temas de sistemas multi-celda como el modelado de la propagación, estimación de canal, multiplexado y demultiplexado, control de potencia y control de rendimiento. Se realiza de manera efectiva un análisis del desarrollo de las técnicas avanzadas de MIMO Masivo y sus algoritmos [34].

Uno de los artículos en el IEEE con más trascendencia sobre MIMO Masivo es "*Massive MIMO for Next Generation Wireless Systems*" ([35]) donde se presenta la tecnología de MIMO Masivo de forma representativa y a modo de tutorial para su fácil lectura sin excesivos incisos técnicos ni matemáticos. Proporciona los beneficios potenciales de esta tecnología mediante ejemplos de simulación con incrementos de capacidad, reducción de PAPR y también se muestran los problemas de esta tecnología

como la contaminación de pilotos, la caracterización del canal o la reciprocidad imperfecta del canal [34].

Otro artículo importante a nivel de introducción para MIMO Masivo es "*An Overview of Massive MIMO: Benefits and Challenges*" ([36]), donde se presenta una visión global desde una perspectiva teórica a una práctica prestando especial atención en el problema de la contaminación de pilotos [34].

Otros artículos importantes donde representan MIMO Masivo son [37], donde se exponen las diferencias entre FDD frente a TDD, [38] donde se presenta una introducción a MIMO Masivo e historia desde su creación no hace muchos años y [39], donde se proporciona un estudio sobre MIMO de gran escala donde cientos de antenas proporcionan servicio a decenas de usuarios.

Las publicaciones más importantes en el tema de cuestiones especiales son artículos donde se habla de los problemas de escalabilidad, procesado de señal y avances recientes son los siguientes: [40], [41], [42], [43] y [44]. Especialmente en [41] "*Recent Advances in Massive MIMO Systems*" se trata de formar un conjunto de los avances más recientes sobre MIMO Masivo como la optimización de sistema MIMO con información de estado del canal para observar la estimación o el estudio del rendimiento del precodificado por regresión para sistemas MIMO-OFDM con multi-usuario.

Uno de los artículos generalistas sobre MIMO Masivo aplicado a 5G donde se contempla como una de las tecnologías clave para el despliegue de las redes de quinta generación es "*What Will 5G Be?*", escrito por J. G. Andrews, S. Buzzi, W. Choi, S. Hanly, A. Lozano, A. C. K. Soong y J. C. Zhang. Otros artículos importantes donde se aplican las soluciones de Massive MIMO a 5G son "*Five Disruptive Technology Directions for 5G*" [45], "*Overview of Full-Dimension MIMO in LTE Advanced Pro*" [46].

También hay artículos dedicados a diferentes temas que se tratan dentro de MIMO Masivo como la arquitectura de MIMO Masivo, estudiada en "*Achieving Massive MIMO Spectral Efficiency with a Not-So-Large Number of Antenas*" en [47], o por un análisis de eficiencia espectral y energética como en "*Energy and Spectral Efficiency of Very Large Multiuser MIMO Systems*" en [48], o por análisis en la estimación del canal como en "*A Coordinated Approach to Channel Estimation in Large-Scale Multiple-Antenna Systems*" en [49].

Para terminar con esta clasificación de los estudios previos de MIMO Masivo cabe destacar el artículo "*Channel Measurements for Large Antenna Arrays*" [50], donde se proporcionan medidas, simulaciones y resultados sobre un sistema de MIMO Masivo usando un array virtual de 112 antenas.

3. MARCO REGULADOR

3.1 Legislación Aplicable Internacional

El despliegue de las redes de quinta generación (5G) será, tarde o temprano, un hecho inminente del que los países y las empresas no pueden quedarse atrás ya que esta red jugará un papel muy importante en el desarrollo de las nuevas tecnologías que permitirán el continuo crecimiento y evolución de la sociedad.

Para llegar a culminar el establecimiento total de las redes 5G tendrán que pasar numerosos plazos y cumplir una cantidad enorme de normativas y requisitos técnicos, como ocurrió con el despliegue de las redes de previa generación (1G, 2G, 3G, 4G).

En este año 2018, como se ha comentado previamente, se está llevando a cabo el primer plazo (primera fase 5G) para el establecimiento del 5G con el estándar que fije unas bases y requisitos de lo que deberán ser las redes de quinta generación por lo que el impacto de este despliegue en la sociedad será palpable en un espacio de tiempo bastante corto.

Surge la necesidad de establecer una normativa clara para que este despliegue sea respaldado de la sociedad y las administraciones locales y nacionales ya que para el despliegue esta nueva tecnología se necesitará introducir infraestructuras más densas, con una cantidad de estaciones base superior a la de las redes actuales para obtener mayor cobertura. Las operadoras de telecomunicaciones tendrán que realizar instalaciones y/o modificar las existentes en las azoteas de los edificios, farolas, etc. provocando un impacto visual y presencial en el entorno por lo que el impacto será directo a la sociedad en zonas urbanas [51].

Una de las preocupaciones de la sociedad con respecto a las tecnologías de comunicaciones móviles es la cantidad de radiación que proporcionan las antenas de estos dispositivos, y, con la creciente demanda y producción de productos inalámbricos, esta preocupación se extiende aún más. Se usarán técnicas de transmisión distintas en las que se incluyen el uso de frecuencias muy altas (*mm-waves*) de alta energía; estas ondas no penetran bien en edificios por lo que puede significar que se amplíe el número de antenas en interiores usando la tecnología MIMO.

Al usar más y más antenas usando el espectro electromagnético la exposición física a estas ondas es real por lo que se piensa que pueden llegar a causar efectos biológicos en nuestro organismo. Al no estar expuestos aún a frecuencias tan altas como las que se esperan usar en 5G (20-40 GHz) no se puede apreciar a priori ningún inconveniente en la salud de las personas aunque existen estudios que añaden cierta preocupación ya que una continua exposición a estas frecuencias podría provocar a largo plazo cambios biológicos en nuestro organismo o incluso enfermedades. Hoy en día no hay una evidencia clara de que la continua exposición a las ondas electromagnéticas de las antenas celulares de nuestro móviles o de las antenas de telecomunicaciones puedan

resultar perjudiciales al ser humano por el hecho de no llevar demasiado tiempo expuestos a este tipo de radiación desde la implantación de la tercera generación, que supuso el despliegue de grandes cantidades de torres de comunicaciones.

De acuerdo con la Asociación Americana Contra el Cáncer (ACS), las ondas radiadas por los teléfonos móviles y por las redes de comunicaciones no tienen suficiente energía como para causar cáncer y dañar las células del ADN pero a altos niveles pueden llegar a aumentar las temperaturas corporales. No es el caso de las redes actuales pero estos posibles riesgos para la salud tienen que ser caso de estudio en el futuro más próximo debido a la implantación de las nuevas redes de telefonía con la llegada de 5G y a la ausencia de estudios con las altas frecuencias que se usarán en 5G [52].

Según empresas importantes del sector como es Ericsson, que destaca la importancia de la responsabilidad de las empresas encargadas en el despliegue y la estandarización de esta tecnología mediante el uso de buenas prácticas, como lo es el uso del *beamforming* para direccionar el uso de energía electromagnética realmente donde es necesaria y así hacer un uso más eficiente del espectro evitando radiar a seres humanos manteniendo una exposición mínima a las ondas electromagnéticas. También constatan que es necesario establecer estándares que limiten la radiación, es decir, que se limite la cantidad de energía radiada de la misma manera que están las redes actuales. Dichos límites los recomiendan organizaciones independientes como la Organización Mundial de la Salud [53].

Otra de las mayores preocupaciones y factores de riesgo más importantes es la seguridad y la privacidad de las comunicaciones de los dispositivos que formen parte de 5G. La seguridad es esencial para las nuevas aplicaciones que están por venir. Previamente en el estado del arte se han puesto varios ejemplos de posibles aplicaciones con la llegada del 5G, la más evidente quizás sea la de los vehículos autónomos, donde la seguridad y privacidad de las comunicaciones es tan importante como las respuestas que tiene que dar el coche para mantener una conducción segura para sus ocupantes.

La seguridad y privacidad de las comunicaciones para 5G va un paso más allá de lo que era en las generaciones previas ya que la seguridad física de las personas está en juego para ciertas aplicaciones por lo que es un desafío muy grande y necesario de cumplir.

Según un *White Paper* de Huawei [54], los sistemas tradicionales de seguridad y privacidad en las comunicaciones han ido evolucionando según las cuatro generaciones ya implementadas a mecanismos más fuertes, como en temas de autenticación por ejemplo, y algoritmos más robustos y seguros para garantizar la privacidad. 5G no es sólo sobre tener una red más rápida y más funciones sino que la diversidad entra en juego y las comunicaciones *End-to-End* tienen que tener una seguridad especializada según el tipo de aplicación. Es así por lo que la seguridad y privacidad en 5G se vuelve más importante aún que en previas generaciones [54].

3.2 Legislación Aplicable Nacional

Para que las comunicaciones móviles se puedan producir de manera ordenada garantizando un servicio de calidad y eficiente a nivel de uso público y privado tiene que haber un gran control sobre el espectro para que no se produzcan solapes y provoquen grandes interferencias imposibilitando así la comunicación y las consecuencias prácticas que ello conlleva. Es por ello por lo que los gobiernos y organizaciones encargadas en la estandarización de las tecnologías lleven políticas de protección y gestión del espectro mediante el reparto de frecuencias a los distintos servicios y operadores guardando unos márgenes suficientes para ofrecer una banda de frecuencia libre de interferencias dedicada solamente al uso proporcionado. Un ejemplo es el Plan Nacional 5G de España. En la siguiente figura podemos ver el espectro utilizado principalmente por las tecnologías de comunicaciones y comprender el límite que tiene como recurso.



Figura 9. Espectro Electromagnético en Radiofrecuencias y otras Tecnologías [57]

Para ser capaces de proteger estas frecuencias de transmisión hay que considerar tres bloques según el Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital que según su uso están reguladas por: uso privativo (corto alcance), uso común y uso especial.

Específicamente, esta normativa está regulada en España por el artículo de la Ley 9/2014 del 9 de mayo, General de Telecomunicaciones y por el artículo 10 del Reglamento sobre el uso público radioeléctrico [58].

El uso privativo es el considerado cuando se usa en exclusiva por un número determinado de usuarios en un ámbito físico de la aplicación para determinadas frecuencias. Su utilización requiere un título específico que habilita al usuario a su explotación, expedido por la Secretaría de Estado para la Sociedad de la Información y la Agenda Digital [59]

El uso común se realiza sin la necesidad de tener una autorización de la Administración pero se debe ajustar a varias condiciones cuyas características están reflejadas, en el caso de España, por las Notas de Utilización Nacional del Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias (CNAF). Cualquier uso fuera de lo que marca el CNAF se considera ilegal y puede ser perseguido por las Autoridades. Estos dispositivos tienen que estar homologados por cada una de las organizaciones. En esta modalidad hay numerosas aplicaciones con características técnicas muy diferentes donde la potencia de los transmisores no superan los 10 mW [60].

El uso de espectro radioeléctrico especial es el que usando las bandas de frecuencias habilitadas de manera compartida se pueden usar sin limitación de operadores y usuarios con las condiciones técnicas necesarias para cada caso [61].

El espectro radioeléctrico no lo gestionan solamente los países, también hay normas internacionales que se fijan por la Unión Internacional de Telecomunicaciones y que deben de seguirse para conseguir un uso eficiente de los mismos.

Dentro de los usos más populares donde se aplica directamente esta normativa están:

- La televisión digital: usa el rango UHF de emisión.
- La radio comercial: usando la técnica de transmisión de frecuencia modulada (FM) con unas bandas de espectro de 87 MHz a 107 MHz.
- WiFi: usan el rango de los 2,4 GHz, los más modernos usando también la banda de 5 GHz. Al tener un ancho de banda más ancho es mejor para navegar por internet y debido a su corta propagación es ideal también para el uso privado en domicilios.

3.3 Estándares Técnicos

Para llevar a cabo el despliegue de una red de estas características es necesario que se cumplan ciertos pasos para ir asentando los estándares que la terminen de definir por completo.

Hay numerosas asociaciones que se encargan de llevar a cabo este tipo de estandarizaciones, una de las más importantes a nivel mundial es 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*), que fue la encargada de llevar a cabo la estandarización y la implantación de LTE, UMTS y GSM, aunque también hay otras asociaciones que buscan tener parte de presencia en 5G como son: GSMA, NGMN y NSA. Estandarizar esta generación será mucho más complicado que las redes de generaciones anteriores por sus numerosos usos y tecnologías y técnicas diferentes, se tienen que llevar a cabo unos plazos más largos y se tiene que llegar a un consenso mundial, y que, de su correcta implementación, dependerá su éxito.

Este año, 2018, es uno de los años clave ya que se da el pistoletazo de salida al establecimiento de los primeros estándares de 5G; 3GPP tiene previsto lanzar la primera etapa, llamada *Release 15*, donde se fijará la principal estandarización con los requisitos a cumplir para que se considere 5G. Los requisitos que deben de cumplir las tecnologías y sistemas de comunicaciones para llegar a ser considerados parte de la quinta generación se han comentado previamente en este trabajo en la sección 5G del estado del arte, que vienen a ser 1 ms de latencia máxima y 1 Gbps de tasa de transmisión mínima entre otros.

El organismo principal que se encarga de generar un orden, establecer los estándares de transmisión y especificar normas de funcionamiento, por delante de 3GPP, es IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*), que es la organización más grande relacionada con los avances en el sector de las telecomunicaciones e ingeniería eléctrica. IEEE desarrolló el estándar a nivel físico y de enlace de datos de red conocido por 802.11 que sirvió para que a nivel de software no se tenga en cuenta qué tipo de conexión es, si inalámbrica o cableada, haciendo las conexiones inalámbricas totalmente compatibles a las cableadas. El estándar 802.11 es el más usado a día de hoy ya que está presente en todas las formas de comunicación cercana y tecnologías de transmisión comunes, y es conocido como WiFi. En la tabla 2.1 previamente presentada se puede observar el estándar de las tecnologías de comunicaciones móviles más importantes a día de hoy, donde en su mayoría son las organizaciones 3GPP e IEEE las que llevan a cabo estas estandarizaciones.

Estas organizaciones serán las encargadas también de establecer las frecuencias con los que estos estándares tendrán que dar soporte a las redes aunque como hemos visto, en cada país es diferente debido a los diferentes usos nacionales del espectro electromagnético.

Dentro de los diferentes países se realizarán subastas de frecuencias para su uso en telecomunicaciones. En España en el 2017 se estableció el Plan Nacional 5G, donde se fijo una hoja de ruta a seguir para conseguir el despliegue final de las redes 5G. Las frecuencias a usar serán las bandas de 1,5 y 3,6 GHz en el 2018, pero se usarán como pruebas piloto las frecuencias de las bandas 3,4-3,8 y 26 GHz, siendo la banda de los 700 MHz una de las más solicitadas (actualmente ocupada por TDT), como lo fue la de 800 MHz en LTE por sus características. En la siguiente figura se pueden observar los pasos a dar por España tras el Plan Nacional 5G para llegar finalmente al despliegue del 5G en el 2020 [55].

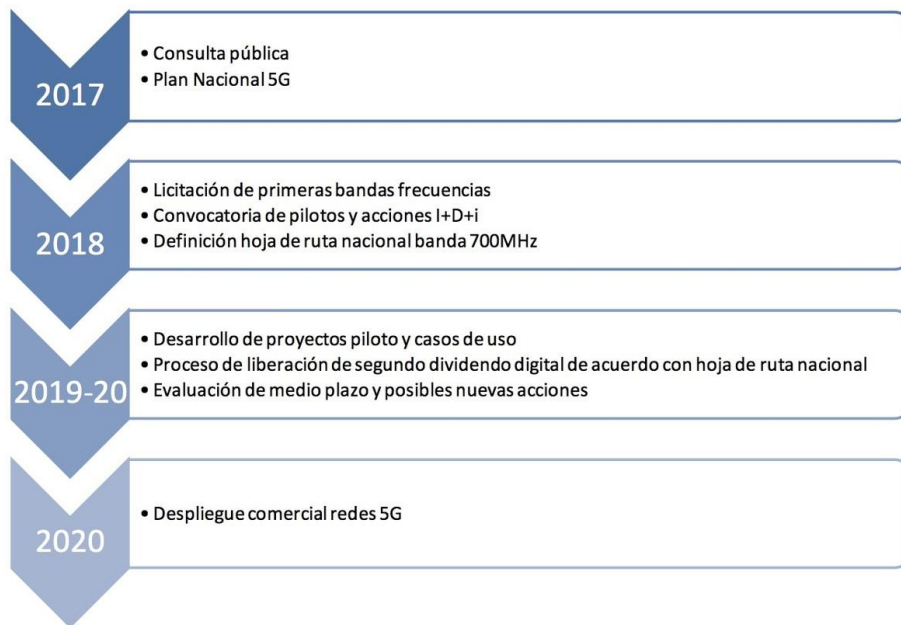


Figura 10. Desarrollo del Plan Nacional 5G [55]

Para el correcto despliegue de las nuevas tecnologías 5G es necesaria una coordinación a nivel Europeo, principalmente, donde la Unión Europea está preparando normativas para llevar a cabo una correcta estandarización cuando ésta se termine de definir por completo.

Según el Consejo de la Unión Europea, todos los países de la unión debían establecer un plan de ejecución (el Plan Nacional 5G en el caso de España) antes de que finalizase junio de 2018. La banda de los 700 MHz se reservará en exclusiva a los operadores móviles para el año 2020 ya que se trata de una banda que ofrece altas velocidades y buena cobertura y permitirá rebajar la brecha digital en los países de los Estados miembros [56].

Con lo que respecta a estándares para la técnica de MIMO Masivo, al estar aún en total desarrollo con prototipos, no hay unos estándares fijados, siendo una de las tareas claves a realizar por las organizaciones encargadas de los estándares. En el año 1998 se creó el primer prototipo MIMO-OFDM por Laboratorios Bell, pero no fue hasta 2008, año en el que se presentó de forma definitiva el estándar IEEE 802.11n, basado en tecnologías MIMO.

3.4 Propiedad Intelectual y Patentes

La patentabilidad de la técnica de transmisión de MIMO Masivo se sabe que se han presentado inscripciones de patentes (*patent application*) por parte de empresas mayoritariamente. La primera patente que se publicó sobre MIMO Masivo fue la denominada US20150092621, se presentó en septiembre del 2013 y se hizo pública dos años después en el 2015 (siguiendo la normativa de patentes de Estados Unidos) y finalmente concedida un año después, en el 2016. La patente llamada "*Full Duplex*

System in Massive MIMO" [62] implementa un sistema de MIMO Masivo sobre un canal inalámbrico en un dispositivo que soporta esta tecnología y fue presentada por Broadcom Corp. como la primera patente que hablaba sobre MIMO Masivo y presentaba un sistema completo usando esta tecnología.

La siguiente figura se trata de un extracto de la patente en la que se observa la estación base transmisora con la tecnología de MIMO Masivo a modo de conglomerado matricial de antenas.

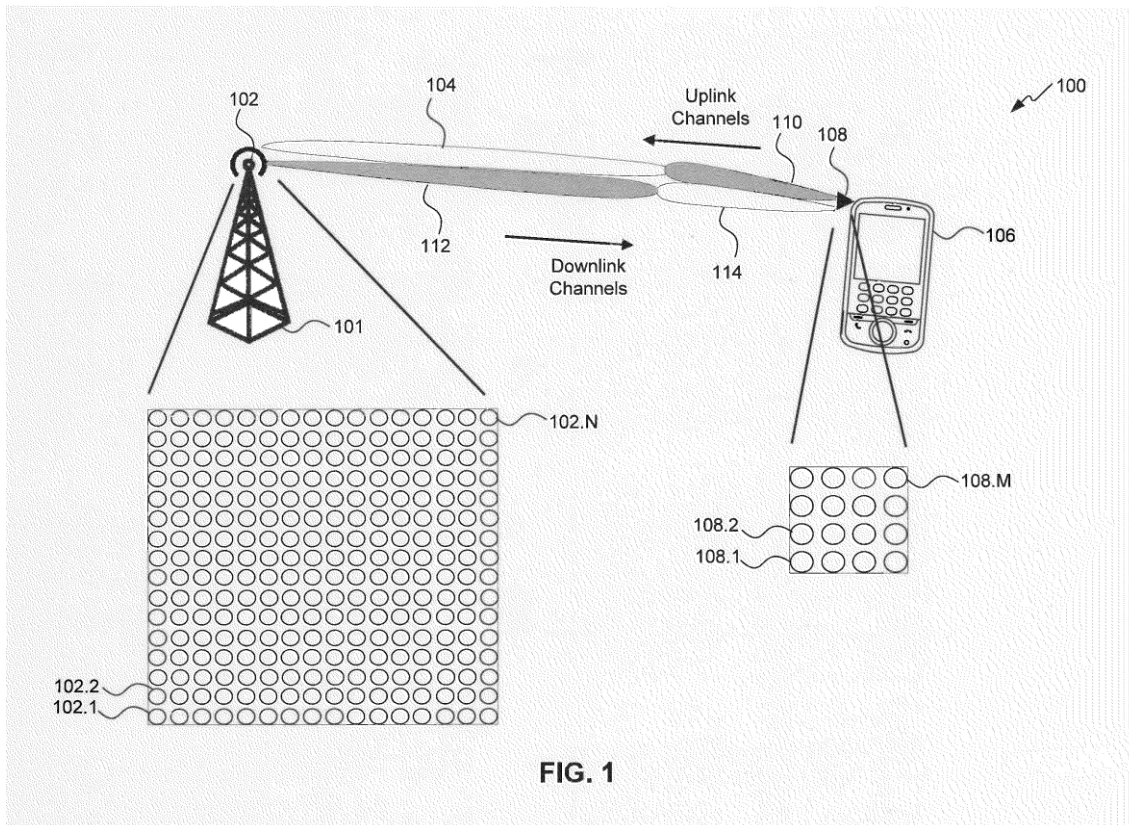


FIG. 1

Figura 11. Esquemático MIMO Masivo de la Patente US20150092621 [62]

En la figura de la patente se puede observar que en la estación base hay un conglomerado de antenas mayor que en el dispositivo móvil, ya que el consumo de energía y el tamaño de las antenas es de menor importancia en una torre de la estación base que en un dispositivo móvil.

A partir de esta solicitud de patente surgieron multitud de solicitudes relacionadas con el uso de MIMO Masivo usando tecnologías más específicas donde las empresas que más patentes han incorporado sobre esta tecnología son: Qualcomm, LG Electronics, Samsung Electronics y Broadcom Corporation.

Otras patentes con especial relevancia dentro del tema de MIMO Masivo que son destacables están: "*Systems and Methods for Massive MIMO Adaptation*" con número US20160294453A1, "*Massive MIMO multi-user beamforming and single channel full*

dúplex for wireless networks" con número de patente US9667330B2 y "*Spatial null creation using Massive MIMO (M-MIMO)*" con número de patente US9300501B2 que fue aceptada en el 2016 y las dos anteriores en el 2017. Como se puede observar, la técnica de MIMO Masivo es una técnica reciente donde se está estudiando y creando prototipos los últimos años por partes de las empresas y universidades.

4. ENTORNO SOCIO-ECONÓMICO

4.1 Impacto socio-económico

El desarrollo de la técnica avanzada de comunicación de MIMO Masivo aplicada a las tecnologías y dispositivos de quinta generación supondrá un avance decisivo para afianzar 5G ya que, por sus características, permitirá alcanzar, y superar, parte de los requisitos técnicos que estas tecnologías requieren.

La quinta generación dará lugar a una revolución sobre las comunicaciones móviles actuales ya que cambiará la manera de comunicarse con el entorno, las personas y la forma de trabajar. Aunque aún no esté del todo definida la red y todos sus requisitos, las aplicaciones y tecnologías "colaterales" que se harán tangibles en un futuro no muy lejano dan pie a predecir una revolución tecnológica que tendrá un efecto directo sobre la sociedad en muchos aspectos del día a día a la vez que generará nuevas oportunidades de negocio.

Un ejemplo de la tecnología que dará lugar a los avances de 5G es el Internet de las Cosas (*IoT*), donde en los múltiples dispositivos y estaciones base dispondrán de tecnología de MIMO Masivo para su correcta escalabilidad y eficiencia. El impacto del potencial económico de Internet de las Cosas para el año 2025 se estima, según la consultora estratégica global McKinsey, entre 4 y 11 mil millones de dólares americanos a nivel mundial considerando esta tecnología como un vínculo entre el mundo físico y el mundo digital necesario [63]. A continuación se muestra en la figura un desglose sobre el potencial económico en Internet de las Cosas según las diferentes tecnologías y ámbitos en IoT en miles de millones de dólares.



Figura 12. Potencial Económico del Internet de las Cosas por Tipos de Aplicación [63]

Las aplicaciones de *IoT* enfocadas a los negocios (*Business-to-Business*) es probable que engloben cerca del 70% del impacto económico total frente a las aplicaciones dedicadas al consumo propio aunque sean las que más atracción generen por traer innovaciones en servicios como la monitorización del estado de salud o los coches autónomos. Debido a que esta tecnología tiene una economía muy dinámica, en los países en vías de desarrollo tendrá un impacto del 40% de su valor aunque el impacto global será mayor en países desarrollados, donde serán los clientes y usuarios directos los que capturarán la mayoría de los beneficios. Dada la digitalización de la tecnología se están creando nuevos modelos de negocio e *IoT* está comenzando a tener un gran impacto en cómo los bienes materiales se crean, se distribuyen y se usan por lo que para que esta tecnología adquiera su completo potencial se tiene que prestar especial atención en conseguir una interoperabilidad entre dispositivos, escalabilidad y en asegurar la seguridad y privacidad de los derechos de los usuarios [63].

El impacto económico directo de la técnica de MIMO Masivo reside principalmente en las bandas de frecuencia en las que transmite debido a la subasta de frecuencias para su uso en el espectro limitado y las propiedades de cada una de las bandas. Últimamente se ha creído que las banda de baja frecuencia como la banda de 1 GHz eran la bandas que más valor e impacto generaban debido a su propagación superior y sus propiedades de penetración en interiores. Pero este paradigma deja de ser cierto en la nueva era donde las empresas de telecomunicaciones ofrecen planes de datos ilimitados y donde la capacidad del canal deja de ser un problema debido al uso de la técnica de MIMO Masivo, cuyo potencial incrementará la eficiencia espectral principalmente en las frecuencias altas, generalmente en las bandas de 3,4 a 3,8 GHz [64].

Se producirá un cambio de paradigma en la industria de las telecomunicaciones debido a la disponibilidad del uso de las bandas de alta frecuencia sin la penalización de capacidad que se tiene en la actualidad. Este cambio de paradigma tendrá un impacto directo en las comunicaciones fijas a móviles y producirá cambios de estrategias por parte de las operadoras de telecomunicaciones a la hora de valorar el uso del espectro [64].

El impacto social directo será el abaratamiento de las tarifas de conexión a internet, incluso su uso gratuito en otros productos domésticos de *IoT* que requieren conexión a internet, proporcionando un acceso a internet al alcance de la mayoría de la sociedad.

Con una vista global, 5G mejorará la experiencia del usuario en todos los aspectos de comunicación, transporte, sociabilidad y productividad, permitiendo un desarrollo de dispositivos, sensores y productos de todo tipo con conectividad a internet. Se estima que la tecnología de la quinta generación 5G creará 22 millones de trabajos y se producirán hasta 12,3 mil millones de servicios y productos para el año 2035 teniendo un impacto positivo en multitud de aplicaciones como en la educación, transporte, seguridad y entretenimiento [65].

Entre los inconvenientes económicos que tendría el despliegue de 5G sería principalmente el alto coste de la infraestructura. Los países desarrollados podrían costearse este despliegue apoyado por las empresas tecnológicas y por sus gobiernos, pero los países en vías de desarrollo tendrían grandes dificultades para alcanzar los recursos suficientes para poder costearse el alto coste del despliegue de infraestructura cuando en algunos países aún no tienen una conexión a internet estable llegando a no superar los 20 Mbps en bajada.

Otro inconveniente a tener en cuenta es la importancia de que las Leyes estatales no se queden atrás en legislaciones sobre la tecnología. El crecimiento tecnológico es exponencial y la legislación de los países no se actualiza a la velocidad que hacen los avances tecnológicos por lo que cuando 5G se consolide es de vital importancia para el correcto funcionamiento de sus productos que exista una regulación legislativa y ética acorde con estos avances.

El exceso de productos de quinta generación que se estima que existirán y formarán parte de nuestro día a día será mucho mayor que en la actualidad como se ha visto previamente por lo que la sociedad se puede enfrentar a problemas que hasta ahora no han existido. Un problema social de especial relevancia que provoca preocupación en gran parte de la sociedad es la hiperconectividad y la adicción que puede crear.

Además de la hiperconectividad surgen problemas éticos sobre el uso de ciertas tecnologías derivadas de 5G, como lo son los coches autónomos que son programados para evitar accidentes de la manera más objetiva posible sin tener en cuenta situaciones de la vida real que un humano realizaría de manera subjetiva, por lo que surge un problema de ética a resolver por profesionales de todos los ámbitos, no solo del ámbito tecnológico, lo que se convierte en un reto social y económico muy desafiante.

4.2 Impacto Medioambiental

Es posible pensar que las comunicaciones móviles no generan ningún tipo de efecto negativo medioambiental por tratarse de elementos sin un enlace físico necesario para su posible comunicación pero detrás de estos dispositivos está el uso ineficiente de la energía y los métodos de reciclaje después de su vida útil que generan grandes desechos tecnológicos, que su mal tratamiento puede contaminar y ser perjudicial para la salud.

Hay organismos que consideran que el recurso del espectro electromagnético se ve contaminado cuando se produce un uso excesivo de él a través de la gran cantidad de frecuencias emitiendo a la vez en un lugar concreto. Para el desarrollo de 5G la eficiencia espectral es uno de los retos a conseguir por lo que aunque habría una gran cantidad de ondas electromagnéticas fluyendo en el medio libre, sólo se utilizarían para la transmisión deseada evitando perder potencia cuando su uso es innecesario, por lo que liberaría el uso del espectro electromagnético haciendo un uso más eficiente del espacio donde se propaga y del espectro.

Una red inalámbrica sostenible no es solamente la que es eficiente espectralmente sino que también debe de ser eficiente en términos energéticos, donde las tecnologías de la información y comunicación ocupan gran parte del consumo global de electricidad [65], y que para el año 2020 se estima que crecerá en un 20% [33]. Este consumo de energía se debe principalmente al uso de los dispositivos de transmisión y recepción como lo son los *routers* y el desarrollo de 5G implica un aumento significativo de esta infraestructura incluyendo estaciones base transmisoras y distintos tipos de M2M. Es por ello por lo que se debe de prestar especial atención al uso energético ya que el incremento de conexiones demandará un uso más intensivo de la energía. Se vuelve, por lo tanto, necesario el uso de energías renovables y la búsqueda de baterías más eficientes y potentes cuyos componentes reduzcan el consumo de energía o lo gestionen de forma eficiente.

La técnica de MIMO Masivo específicamente, al usar múltiples antenas, consume gran cantidad de energía que se tiene que gestionar de forma eficiente mediante el uso de energías renovables, sobre todo en las estaciones base, ya que dispondrán de una gran cantidad de número de antenas frente a menos antenas que dispondrán los dispositivos móviles usando MIMO Masivo, que tendrán que ser especialmente eficientes ya que dispondrán de baterías con un gran límite energético y un espacio cada vez más reducido.

Técnicas como el *beamforming*, gestionan el direccionamiento inteligente de los lóbulos radiados por las antenas para disminuir el uso de energía y aumentar la eficiencia y la directividad. Otra técnica que puede servir para reducir el uso de energía es la técnica de reducción de los picos de potencia (*PAPR, Peak to Average Power Ratio*), la cual, aun no siendo su objetivo principal, puede disminuir el uso de energía. Este tipo de técnicas forman parte del desarrollo de 5G para que la comunicación sea lo más eficiente y limpia posible, convirtiendo la preocupación por la eficiencia y por minimizar el impacto medioambiental como un requisito fundamental para el desarrollo de las nuevas técnicas de comunicaciones.

Para ser capaces de abastecer la gran cantidad de energía que requieren las estaciones base con MIMO Masivo el uso de energías renovables es una de las mejores soluciones. Según Ericsson, las tecnologías de la quinta generación serán 10 veces más eficientes energéticamente en cinco años que en 4G. La instalación de generadores con placas solares para suministrar energía a las estaciones base es una de las posibilidades para ahorrar energía [67].

Otro aspecto de vital importancia para 5G es que, tras el aumento exponencial de dispositivos con la tecnología de MIMO Masivo, al terminar el ciclo de vida de los dispositivos no se reciclen correctamente generando lo que se denomina la basura electrónica o *e-waste*.

La basura electrónica es un hecho hoy en día y supone una contaminación muy negativa hacia el medioambiente, siendo también perjudicial para el ser humano por los gases que expulsa al desmantelar los componentes electrónicos que contienen materiales que en cantidad se vuelven tóxicos. Debido al avance de los productos tecnológicos inalámbricos y de su crecimiento exponencial, este tipo de basura no para de crecer y amontonarse en los vertederos (cerca de 60 millones de toneladas métricas cada año) sin ser tratados adecuadamente.

Al verse incrementado el número de dispositivos estimado para el futuro de forma exponencial, el tratamiento del *e-waste* se ha vuelto uno de los principales problemas a resolver ya que el acumulo de esta basura se ha vuelto insostenible principalmente por los escasos sistemas de reciclaje existentes y por el negocio de esta basura en el mercado negro de países en vías de desarrollo. Los gobiernos y las empresas que crean estos productos tienen que tener planes de reciclaje y métodos sostenibles de reutilización de sus productos para evitar que cuando terminen sus ciclos de vida perjudiquen al medioambiente y a la sociedad.

4.3 Presupuesto de Elaboración del TFG

El presupuesto de este Trabajo de Fin de Grado ha sido calculado en base a lo que estipula el documento "La Práctica del Ejercicio Profesional por los Ingenieros de Telecomunicaciones" del Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación (COIT) en su capítulo 8 "Baremos de Honorarios Orientativos para Trabajos Profesionales".

Tras observar los baremos y las recomendaciones del COIT, en este cálculo del presupuesto se tendrán en cuenta los siguientes aspectos de elaboración: recursos a nivel software, recursos a nivel hardware, costes humanos y recursos fungibles y no fungibles (material de oficina etc.).

4.3.1 Recursos de Software

En esta sección se presenta el coste de las herramientas usadas para llevar a cabo este trabajo por sus licencias o costes de mantenimiento. El coste del Sistema Operativo usado está incluido en el precio del ordenador usado en el siguiente apartado de hardware.

Las herramientas/programas usadas de software para la elaboración de este proyecto son:

- MATLAB® R2017B
- Microsoft Office Word 2017
- Google Drive

Posteriormente se muestran los costes de las licencias de los programas mencionados:

Tabla 4.1: ENUMERACIÓN DE LOS COSTES DEL TFG CON PRECIOS

Herramienta	Unidades	Valor Unidad	Valor Unidad (IVA)	Coste Imputable	Coste Imputable (IVA)
MATLAB®	2	2000 €	2420 €	4000 €	4840 €
Microsoft Word 2007	1	150 €	118,5 €	150 €	118,5 €
Google Drive	1	0 €	0 €	0 €	0 €
TOTAL	-	2150 €	2538,5 €	4150 €	4958,5 €

4.3.2 Recursos de Hardware

En esta sección se presenta el coste de los recursos utilizados de herramientas de hardware donde nos encontramos los ordenadores portátiles personales y ordenadores fijos de la universidad usados para la implementación del sistema MIMO-OFDM a través de la herramienta MATLAB® y Microsoft Word para la redacción de esta memoria.

El ordenador portátil personal usado es el siguiente:

HP Pavilion G6 (SO: Windows 7) con PVP: 540€

El precio total del ordenador utilizado es de 540€. Hay que tener en cuenta que el uso de estos equipos no ha sido exclusivo para la elaboración del sistema de implementación para hacer este TFG ya que también se ha usado para hacer otros trabajos como uso personal, por lo que un precio de amortización estimado de uso rondaría entre el 5 y 10% del precio de los mismos (especialmente el ordenador portátil HP).

El coste total sería: $54€ + 80€ = 134€$

También habría que tener en cuenta los recursos fungibles y no fungibles utilizados durante la realización de este trabajo, como el material de oficina usado (folios, bolígrafos, impresiones de artículos etc.) que, aunque se haya depreciado en el cálculo de material usado al no ser elementos tan importantes como los ordenadores también hay de tener en cuenta ya que han servido de ayuda para el desarrollo de este trabajo.

4.3.3 Costes Humanos

Para la elaboración completa de este trabajo de Fin de Grado ha sido necesario el desempeño y ayuda de la la tutora de este trabajo, María Julia Fernández-Getino García, cuya función ha sido la de supervisar, tutorizar y prestar apoyo, en el desarrollo del

sistema completo en OFDM adaptado para MIMO para su posterior ampliación a MIMO Masivo y simulación de los diferentes escenarios.

Según el documento del COIT, el coste humano para el desarrollo de un proyecto se computa según las horas dedicadas por cada una de las partes en la que hay que tener en cuenta la estructura de una planificación de las tareas desempeñadas. Este trabajo comenzó en junio de 2017 y ha finalizado en septiembre de 2018 donde han sido necesarias unas 2 horas de reuniones semanales con la tutora con su consiguiente trabajo posterior (4 h/s), por lo que el cómputo total de horas dedicadas supera las 300 horas que establecen los 12 ECTS de la asignatura.

Tabla 4.2: ENUMERACIÓN DE LOS COSTES HUMANOS POR HORAS

	€/h	Horas Totales	Coste Total
Ingeniera Senior (Tutora)	70	300	21.000€
Ingeniero Junior (Autor)	45	500	22.500€

4.3.4 Coste Total del TFG

Para calcular el coste total de este Trabajo de Fin de Grado es necesario tener numerosos factores de los que para un trabajo de estas características se desconocen o son innecesarios, como son, los gastos energéticos, costes indirectos etc. por lo que no podemos obtener un coste total preciso por completo pero podemos tener una visión global del mismo con el conjunto de los costes de los recursos de hardware y software, además de coste humano que tienden a ser alrededor de 48.512,5€ .

5. CONCEPTO BÁSICO DE OFDM

OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) es una técnica de transmisión en el que se transmiten los datos de forma paralela para un determinado número de subcanales o, en otras palabras, los diferentes sub-canales llevan diferentes partes de los datos modulados. Se trata de una técnica muy utilizada porque combate la dispersión temporal de manera muy eficaz al transmitir los datos sobre multitud de portadoras (subportadoras) que tienen una tasa binaria pequeña. La dispersión temporal se produce de manera inevitable debido a los efectos que produce el canal sobre la señal a transmitir, entre ellos: las pérdidas producidas por la propagación (directamente proporcionales al cuadrado de la distancia), la selectividad del canal en frecuencia y el *multipath propagation* (propagación multitrayecto) provocando interferencia entre símbolos (ISI).

Todos estos efectos negativos tienen que ser combatidos por el diseño de un sistema robusto, es por eso que usamos la técnica OFDM ya que al ampliar la longitud del símbolo usando una modulación en multiportadora con prefijo cíclico podemos eliminar en el receptor toda la ISI mediante la aplicación de un intervalo de guarda, minimizando a su vez la dispersión temporal.

En la actualidad, como se ha hablado en la sección del Estado del Arte, OFDM es la técnica de modulación usada para multitud de sistemas de transmisión de banda ancha como la Televisión Digital Terrestre (DVB-T), DAB y también en WiFi y WiMAX, además de LTE.

La técnica de modulación usada se basará en multiportadoras por lo que se usan de acuerdo con el concepto de dividir la secuencia de datos transmitida de manera paralela e independiente en los subcanales transmitiendo los símbolos de manera simultánea. En la siguiente figura podemos ver la diferencia entre una portadora y varias portadoras (5 en este caso) en el espectro de OFDM.

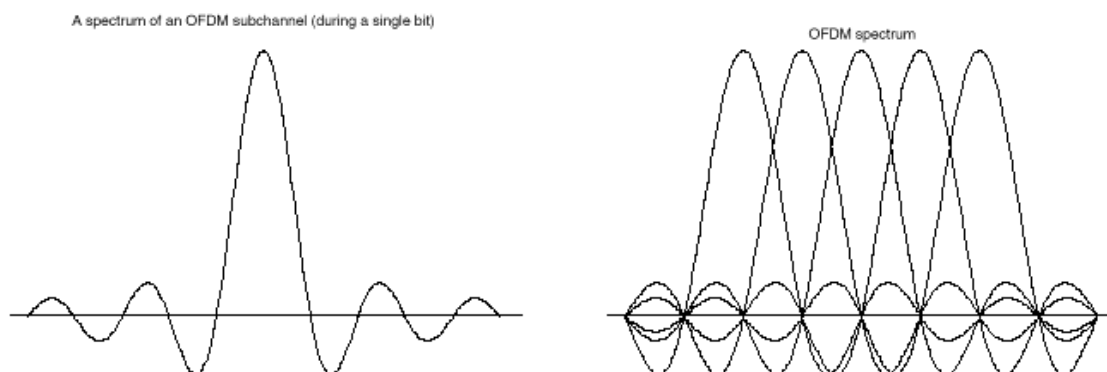


Figura 13. Espectro OFDM en frecuencia con una vs. con varias portadoras [68]

La técnica OFDM trata particiona el ancho de banda disponible (BW) en las N subportadoras (*subcarriers*), tras previamente obtener una secuencia de símbolos

precodificada mediante constelaciones (M-QAM o M-PSK), consiguiendo que cada símbolo module cada una de estas subportadoras. Hay que tener en cuenta el espaciado entre ellas, el cual tiene que ser $\Delta f \geq BW/N$ y posteriormente, al multiplexar estas subportadoras en frecuencia se generará el espectro de un símbolo OFDM (compuesto por N símbolos de datos).

Uno de los objetivos a cumplir es la alta eficiencia espectral, y esto se consigue ya que la respuesta en frecuencia de los subcanales se superponen entre sí de manera ortogonal como se puede observar en la segunda representación de la figura 13. De esta manera se evita producir interferencias entre las portadoras, *Intercarrier Interference* (ICI). La condición de ortogonalidad entre las formas de onda de la base es la siguiente:

$$\int_0^T \cos(\omega_i t) \cdot \cos(\omega_j t) dt = 0$$

donde T es el periodo de símbolo OFDM y vale $T=1$, siendo R_m la tasa de transmisión de cada portadora.

Para conseguir una transmisión sin problemas de sincronismo se necesita una cadena transmisora y receptora capaz de modular y demodular al mismo tiempo la totalidad de las portadoras. Los símbolos complejos de las portadoras se convierten en una señal OFDM tras su transformada discreta inversa de Fourier (IDFT) por lo que de manera contraria los símbolos complejos de las portadoras son la transformada discreta de Fourier (DFT) de la señal temporal OFDM. Para conseguir una implementación del sistema OFDM computacionalmente ventajosa y eficiente es necesario que el proceso de modulación y demodulación se realice en tiempo discreto, para poder realizar este proceso con la totalidad de las diferentes portadoras, se puede llevar a cabo mediante el uso de la Transformada Rápida de Fourier (FFT) y la Transformada Inversa Rápida de Fourier (IFFT) [69].

En la figura 14 se puede observar de manera gráfica la representación de una señal OFDM en tiempo y en frecuencia, pudiendo observar por completo los símbolos OFDM, las subportadoras ortogonales y los intervalos de guarda entre símbolos OFDM.

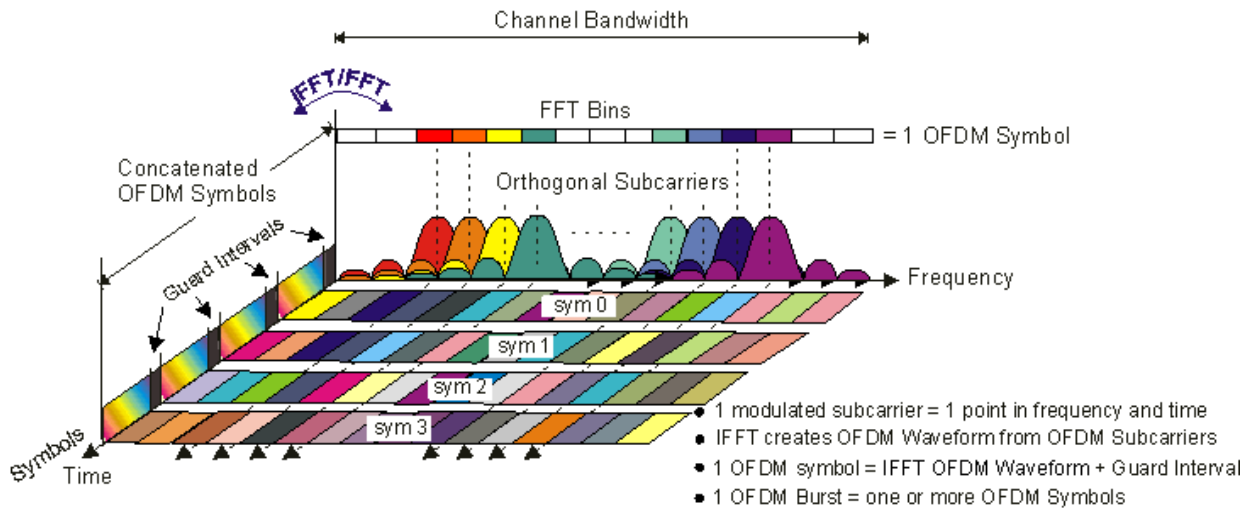


Figura 14: Representación gráfica de una señal OFDM en Tiempo y Frecuencia [70]

En las siguientes figuras se puede visualizar el diagrama del modulador OFDM y del demodulador OFDM.

En la figura 15 tenemos el diagrama del modulador OFDM donde partimos de bits a una cierta tasa binaria. Posteriormente, el flujo de bits atraviesa un mapeador para la construcción de la constelación elegida y después atraviesa un convertor serie-paralelo. Tras el mapeo, los símbolos se convierten con un modulador digital de fase y cuadratura en una secuencia con una posición en forma compleja (símbolos complejos) y después se realiza la Transformada de Fourier Rápida Inversa (IFFT) sobre los símbolos complejos obteniendo en frecuencia una sucesión de N (n° de portadoras) deltas desplazadas. Una vez en el dominio del tiempo se procede a insertar el prefijo cíclico y a convertir la señal de digital a analógica con un convertor.

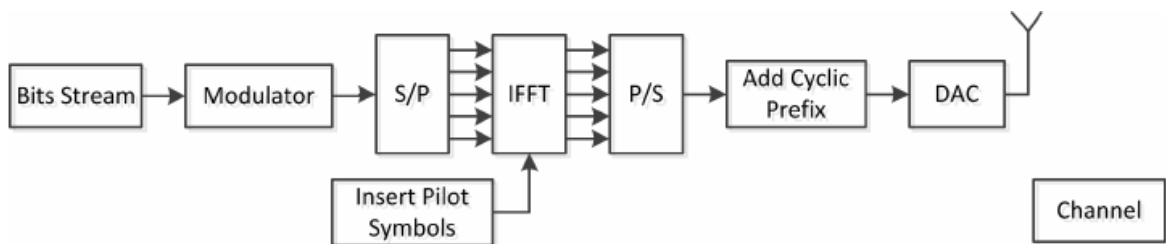


Figura 15: Modulador OFDM [87]

La señal resultante $s(t)$ a transmitir será finalmente un sumatorio de todos los símbolos en paralelo. La parte imaginaria representa la componente en cuadratura modulada por un seno (de frecuencia ω) y la parte real representa la señal en fase modulada por un coseno (también con frecuencia ω) por lo que podemos expresar el símbolo OFDM obtenido como:

$$s(t) = \sum_{n=0}^{N-1} [i_n \cos(\omega_n t) + q_n \sin(\omega_n t)]$$

A continuación se puede visualizar el diagrama esquemático del demodulador tras atravesar la señal el canal. La señal transmitida $s(t)$ se puede detectar ya que las funciones del coseno y del seno son ortogonales entre sí de manera que se pueda recuperar en recepción la información de cada portadora realizando la FFT (Transformada Rápida de Fourier). Se usa la FFT precisamente para que el tiempo de producción/detección de las señales OFDM sea el más pequeño posible [72].

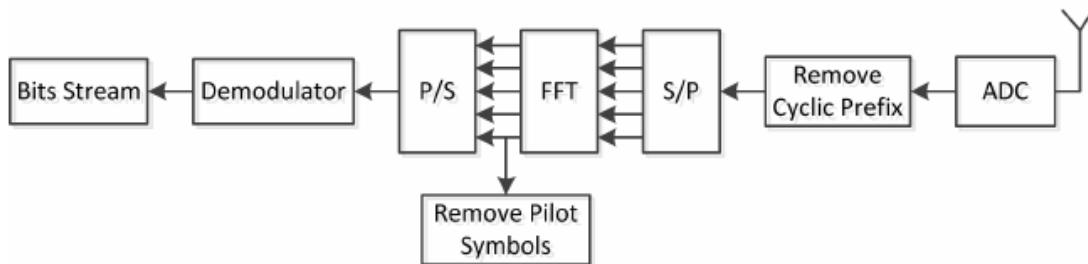


Figura 16: Demodulador OFDM [87]

En la detección hay que tener en cuenta los efectos negativos que produce el canal sobre la señal $s(t)$ transmitida. Al disponer en recepción de una señal distorsionada se necesitan técnicas de detección más complejas para extraer la señal deseada y paliar así los efectos del canal mediante métodos de estimación por señales pilotos. En la figura 17 se refleja el diagrama de bloques de una transmisión OFDM donde se puede observar algunos de los efectos que produce el canal sobre la señal transmitida, entre ellos la adición de ruido Gaussiano o el desvanecimiento de la señal denominado *Rayleigh Fading*, u otros como la propagación multitrayecto (*Multipath Propagation*) o la selectividad en frecuencia y la dispersión temporal.

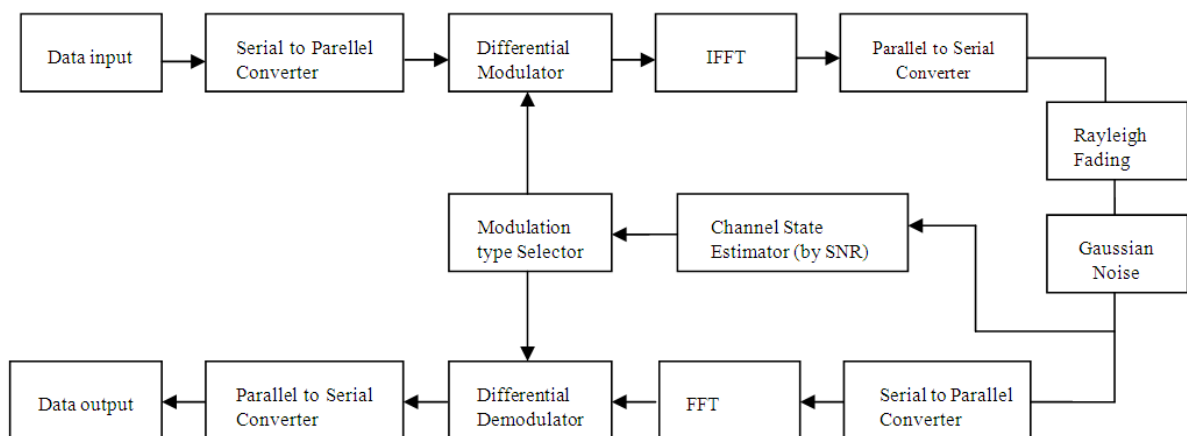


Figura 17: Diagrama de Bloques Completo OFDM [71]

Para poder detectar la señal recibida correctamente se usan técnicas de estimación de canal para poder recuperar la señal deseada con el mínimo error posible, y para ello se usan pilotos que se transmiten simultáneamente con los datos. Para estimar el canal se utilizan métodos como el de Mínimos Cuadrados (*Least Squares*) para que en recepción

se pueda invertir la señal recibida y obtener la información deseada. Posteriormente, habría un bloque donde se produciría una estimación del canal por interpolación en frecuencia, mediante la técnica de *Zero-Padding* en tiempo.

Al tener la señal recibida, $r(t)$, una componente de ruido, la estimación previa tendrá un error de estimación. Después se ecualiza la señal estimada por métodos como el de *Zero-Forcing*, para compensar la selectividad en frecuencia, eliminar la interferencia intersimbólica (ISI) y obtener así una señal estimada muy cercana a la señal transmitida previamente.

Finalmente, y de manera inversa a la del modulador, se pueden llegar a obtener las señales deseadas, el error en la recepción/estimación se puede medir con la BER (*Bit Error Rate*), que representa los bits erróneos entre bits totales enviados, y el MSE (*Mean Squared Error*) de la estimación del canal.

Prefijo Cíclico

Al transmitir símbolos de transmisor a receptor, estos símbolos están expuestos a la interferencia entre ellos por solapamiento (con versiones retrasadas de estos símbolos), debido a los efectos del canal, generalmente producida por la propagación multitrayecto y otros efectos resultantes como la selectividad en frecuencia dentro de la banda en uso. Esta interferencia conduce a la detección errónea en el receptor, al degradar la señal debido a la pérdida de la ortogonalidad (ICI - *Intercarrier Interference*), por lo que surge la necesidad de combatir esta interferencia mediante diferentes técnicas.

La técnica que mejor combate este efecto es la utilización del prefijo cíclico. Después de la IFFT se añade una copia de la parte final del símbolo adicionado al principio del símbolo; de esta manera la periodicidad queda garantizada y se eliminaría la ICI. El tamaño, en tiempo, que debe de cumplir este CP debe de ser mayor al máximo retraso de difusión ocasionado por el canal (*maximum delay spread*); de esta manera se evitaría en gran parte la Interferencia Intersimbólica. En la siguiente figura se puede observar el efecto del CP y como solventaría esta interferencia.

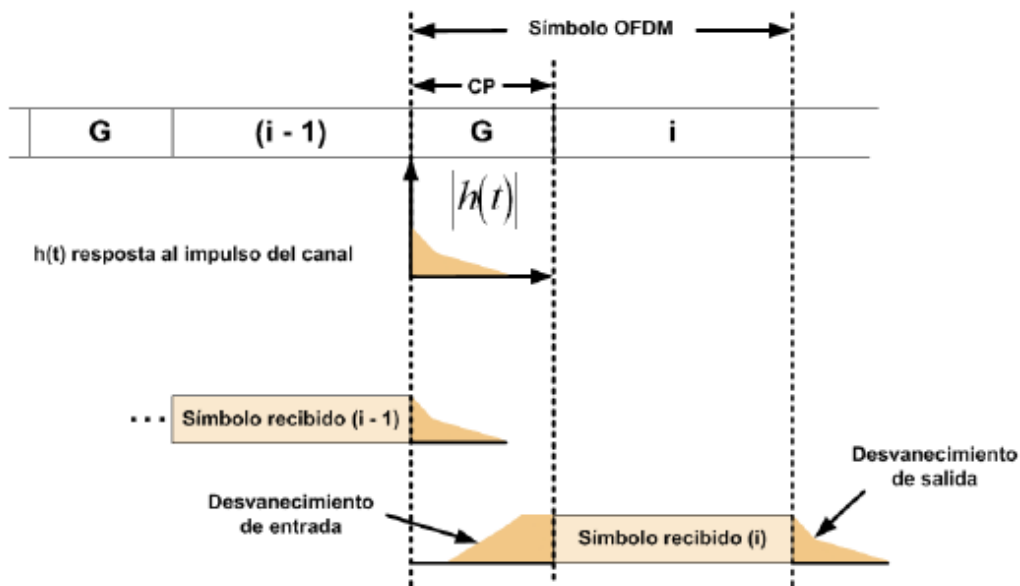


Figura 18: Inserción de Prefijo Cíclico en los símbolos OFDM [71]

Para concluir con la explicación conceptual de la transmisión OFDM conviene resumir las ventajas e inconvenientes de esta técnica. Los inconvenientes de esta técnica de modulación son: la alta sensibilidad a errores provocados por la pérdida de sincronización y el alto PAPR (*Peak-to-Average Power Ratio*). Las ventajas de esta técnica comparadas con la de una única portadora son especialmente la alta eficiencia espectral, grandes velocidades en escenarios complejos y baja complejidad de implementación [71].

6. PRINCIPIOS DE MIMO MASIVO

Se comienza el capítulo 6 explicando en qué consiste la técnica SISO (*Single-Input Single-Output*), que como su nombre indica, se trata de un sistema donde tenemos un único terminal (antena) de salida y uno de entrada. Este sistema ha sido el que más se ha aplicado a la hora de establecer una comunicación inalámbrica; en la figura 19 se puede observar el sistema SISO en la izquierda.

Surgen, motivados sobre todo por la necesidad de un incremento de velocidad de transmisión, de fiabilidad, robustez y la mejora de la eficiencia espectral de las comunicaciones, diferentes configuraciones de las interfaces físicas para poder conseguir estos objetivos.

6.1 Concepto de Multi-Antena (MIMO)

Entre estas configuraciones están las técnicas MISO (*Multiple-Input Single-Output*), SIMO (*Single-Input Multiple-Output*) y, finalmente, MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*).

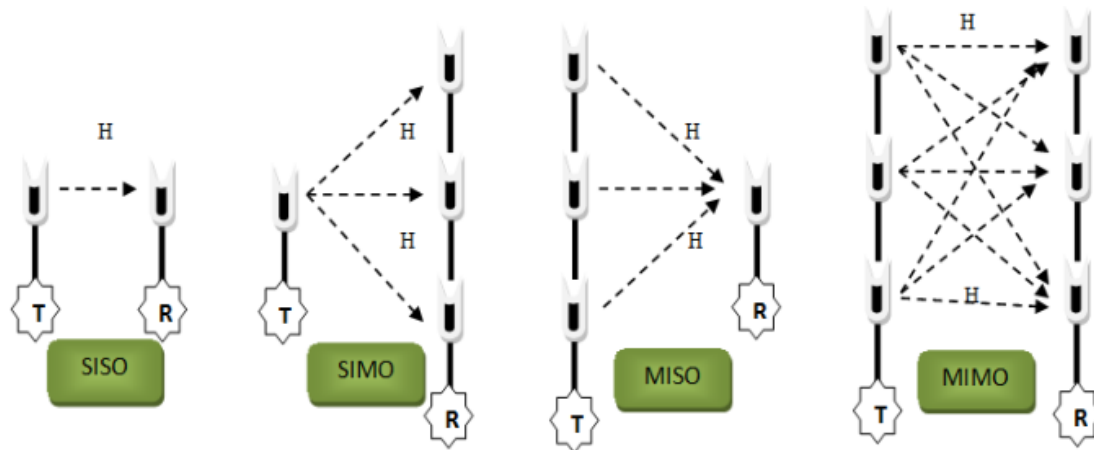


Figura 19: Tipos de Configuraciones Multiantena [72]

En la figura 19 se pueden observar las siguientes configuraciones:

SISO: Una antena transmisora, una antena receptora.

SIMO: Una antena transmisora, N antenas receptoras.

MISO: N antenas transmisoras, una antena receptora.

MIMO: N antenas transmisoras, M antenas receptoras.

La principal característica de los sistemas con múltiples antenas en transmisión y recepción es que el aumento de la capacidad del canal, medida en Bits/s/Hz, es proporcional al incremento del número de antenas en entrada y salida. En la siguiente gráfica se pueden observar las curvas de la capacidad vs la SNR (*Signal-to-Noise Ratio*)

en las que se puede sacar la conclusión de que el aumento en número de antenas aumenta la capacidad de manera proporcional.

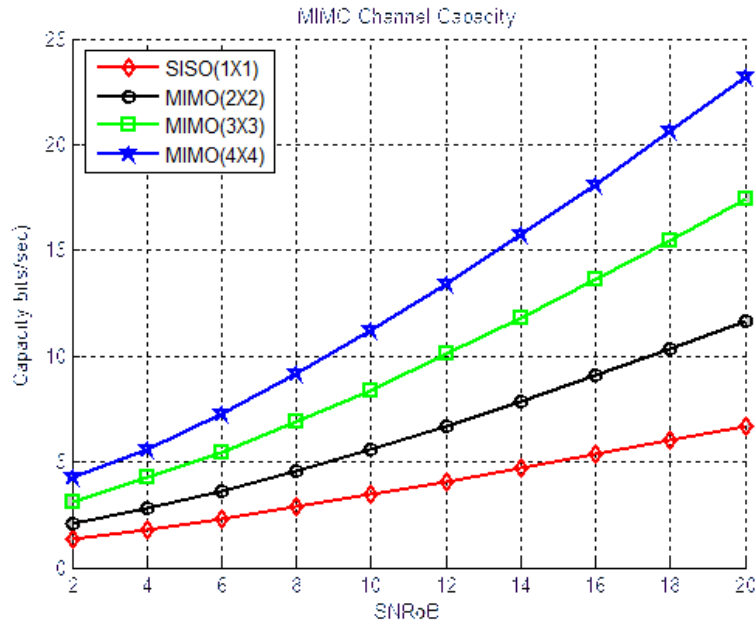


Figura 20: Capacidad del Canal vs. SNR [73]

De la misma manera, al usar más antenas en los sistemas de comunicaciones, la relación de la BER (*Bit Error Rate*) vs. SNR se ve mejorada notablemente conforme más antenas se usan en el sistema. Se tienen unas curvas de la probabilidad de error de bit (Pe) cuya variación es proporcional a la SNR con la siguiente expresión:

$$Pe \propto (SNR)^{-d}$$

donde el valor de d es la ganancia de diversidad que tiene el sistema en concreto.

Por ejemplo: para un sistema SISO, $d=1$ y para un sistema MIMO con N antenas transmisoras y M antenas receptoras $d=NM$.

A continuación, en la figura 21 se puede observar la variabilidad de las curvas SNR vs. BER para diferentes configuraciones MIMO y el aumento considerable del rendimiento del sistema a medida que se van añadiendo antenas de transmisión y de recepción.

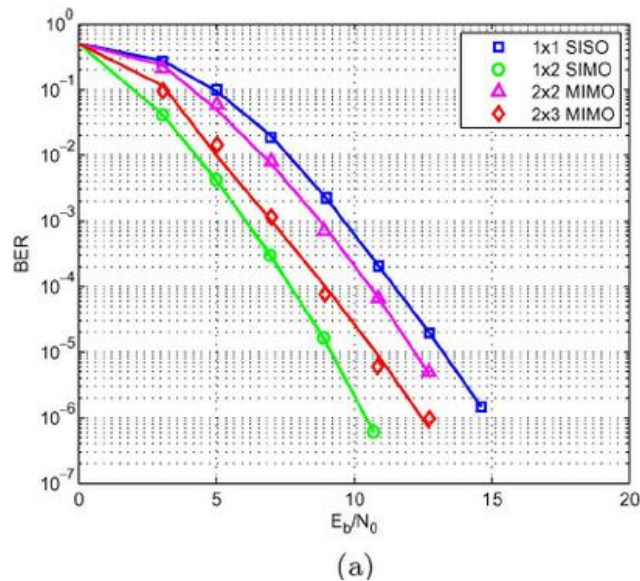


Figura 21: Análisis del Sistema SISO-MIMO [74]

Diversidad y Multiplexado Espacial

Dependiendo de los objetivos de la aplicación de la técnica de múltiples antenas que se quiera alcanzar, se pueden implementar los sistemas MIMO de varias maneras en las que destacamos dos técnicas diferentes:

1. Diversidad Espacial (*Spatial Diversity*).
2. Multiplexación Espacial (*Spatial Multiplexing*).

Si el interés de implementación recae en mejorar la fiabilidad del enlace usaríamos la implementación MIMO de la diversidad espacial, que consiste en enviar los mismos datos a través de diferentes caminos de propagación (*propagation paths*), de manera que si alguna porción de los datos se pierde por efectos del canal o interferencias, la probabilidad de que llegue al receptor por ser enviada por otra antena transmisora diferente aumenta de forma considerable, y por lo tanto, su rendimiento mejora notablemente. La técnica de diversidad más utilizada es la de Alamouti donde se mejora la ganancia por diversidad.

Si por el contrario, el objetivo no es tan enfocado en la diversidad sino en mejorar la velocidad de transmisión de datos del sistema la técnica a implementar será la transmisión a través del multiplexado espacial, que se encarga de enviar datos distintos a través de diferentes antenas y por tanto van a través de diferentes caminos de propagación, para así, provocar un gran incremento en la transmisión de datos.

En la siguiente imagen se puede observar de manera gráfica las diferencias entre ellos.

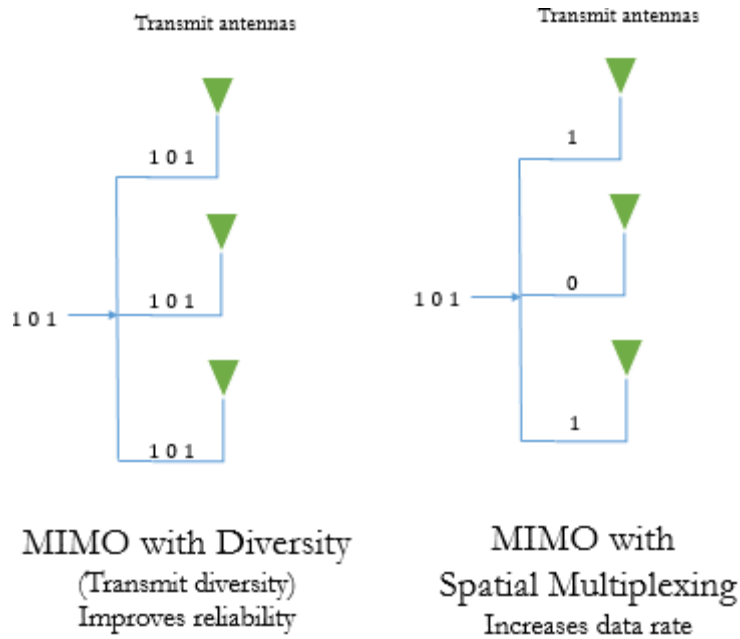


Figura 22: Diversidad Espacial frente Multiplexado Espacial en Sistemas MIMO [75]

En la imagen anterior se puede observar cómo sería el flujo de datos y su envío por las antenas para obtener uno u otro efecto.

En las siguientes figuras se presenta el sistema completo de manera que se puede observar de manera clara las diferencias entre Diversidad y Multiplexado Espacial. En el desarrollo del sistema implementado en este Trabajo se ha decidido el uso del Multiplexado Espacial frente a la Diversidad, que aunque el rendimiento sea ligeramente peor, la tasa de velocidad de transmisión mejora notablemente.

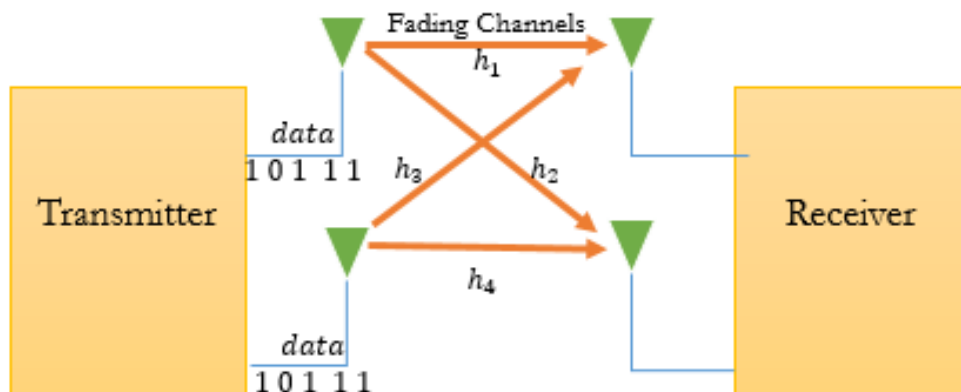


Figura 23: Sistema MIMO con Diversidad [75]

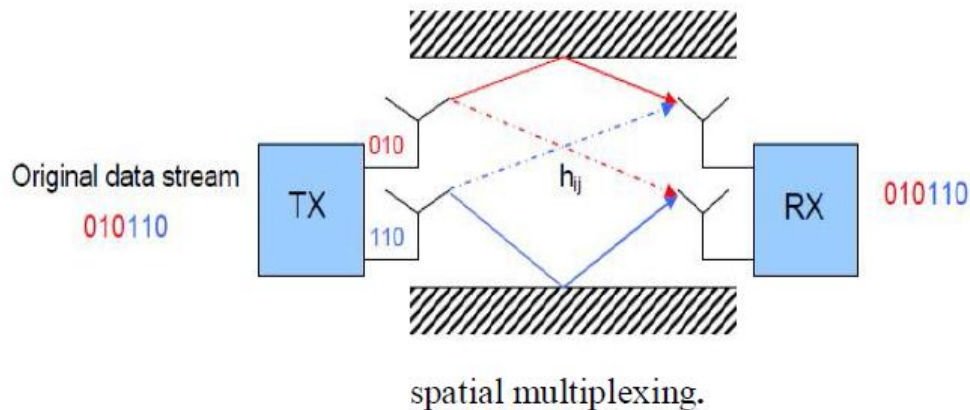


Figura 24: Sistema MIMO con Multiplexado Espacial [76]

Sistema de Transmisión MIMO - OFDM

Una de las principales características del uso conjunto de la técnica de modulación OFDM con la técnica MIMO es la transformación por parte de OFDM de un canal MIMO selectivo en frecuencia en una combinación de canales contiguos y planos en selectividad de frecuencia, por lo que queda reducida la dificultad de construcción del receptor. La selectividad en frecuencia que presenta el sistema MIMO se da especialmente a causa del aumento de la propagación multitrayecto de sus canales cuando se propaga a velocidades de transmisión elevadas [72].

El siguiente diagrama de bloques representa un transmisor y receptor MIMO-OFDM, donde la mayoría de los pasos mencionados en el capítulo 5 del modulador y el demodulador son prácticamente idénticos salvo su adecuación a MIMO, siendo necesario en el modulador un codificador MIMO para el flujo de datos entrante en el caso del transmisor. Se añade el CP a cada símbolo OFDM y un preámbulo para la sincronización por lo que en la salida, se construye el llamado *frame* de datos en el dominio del tiempo.

En el receptor, el demodulador usa el preámbulo de los símbolos OFDM recibidos para sincronizarlos en tiempo y en frecuencia. Posteriormente, después de la extracción del CP y el preámbulo, la parte restante del símbolo OFDM se demodula con la FFT (Transformada Rápida de Fourier), se extraen los pilotos en el dominio de la frecuencia para realizar la estimación del canal y finalmente, tras conseguir una estimación del canal se acaba decodificando la secuencia de símbolos OFDM deseados y los bits llegan a su destino [72].

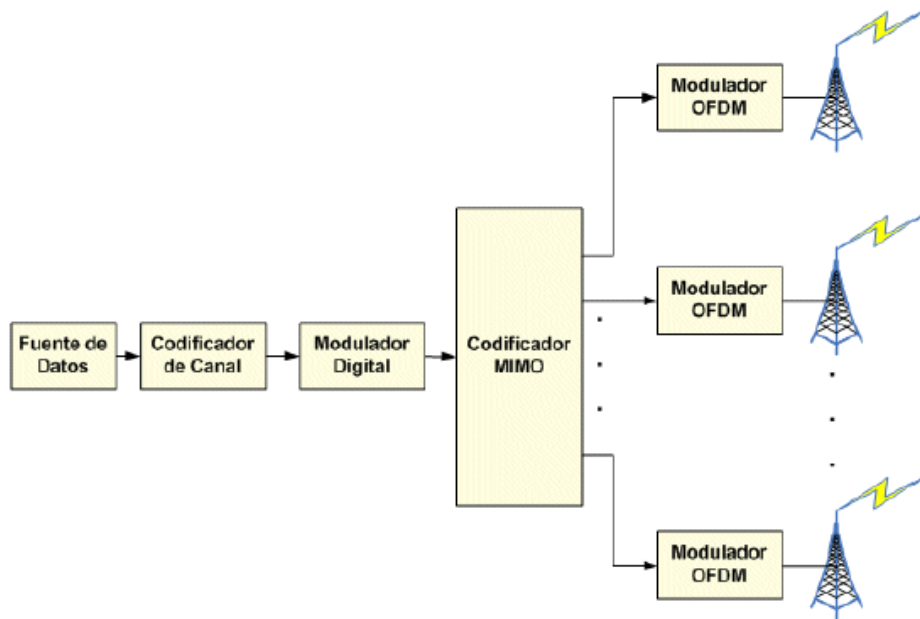


Figura 25: Diagrama de un Transmisor MIMO-OFDM [72]

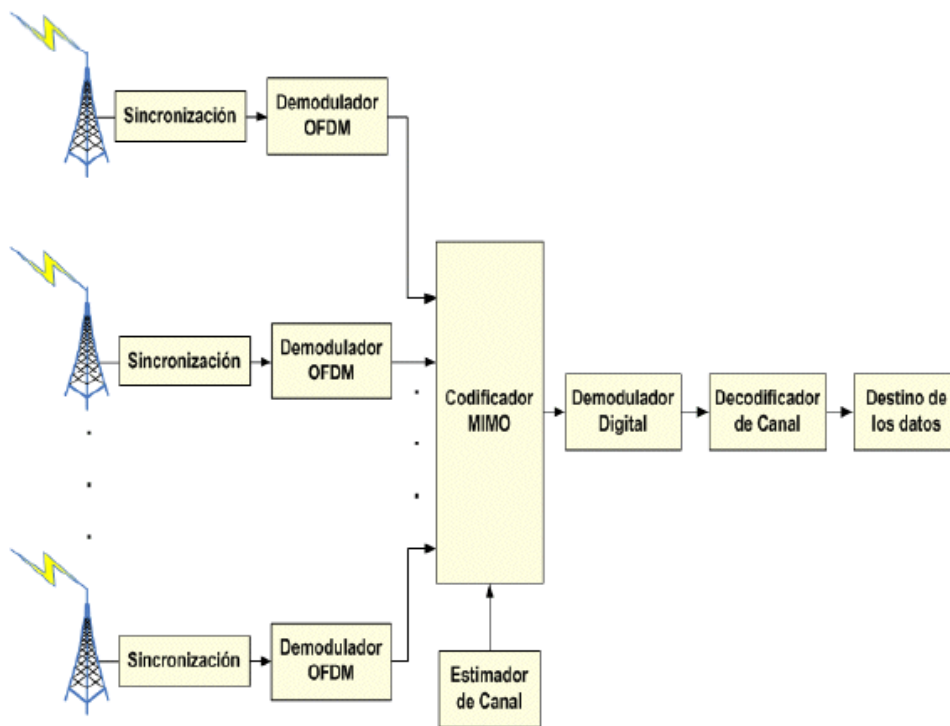


Figura 26: Diagrama de un Receptor MIMO-OFDM [72]

6.2 Extensión a Múltiples Antenas: MIMO Masivo

Massive MIMO, en inglés, o MIMO Masivo en castellano, consiste básicamente en el uso de un mayor número de antenas en transmisión y en recepción para mejorar el rendimiento de la transmisión de datos y su tasa de transmisión debido a la mayor cantidad de caminos posibles en los que los datos se propagan. Pero la aplicación de esta técnica supone una mayor complejidad del hardware utilizado y del procesado de la señal en ambos extremos donde, además, el consumo de energía se dispara.

Es común cuestionarse cuando un sistema MIMO pasa a considerarse MIMO Masivo y, aunque no hay ninguna especificación fija y al tratarse esta de una extensión de MIMO, pasa a considerarse un sistema como MIMO Masivo cuando la agrupación de antenas pasa a ser de decenas y centenares en el transmisor y receptor, por ejemplo: MIMO 16x16.

Según el proyecto FP7-MAMMOET de la Unión Europea, MIMO Masivo comenzó a visualizarse para la Duplexación por División en Tiempo (TDD), pero se ha comprobado que funcionaría también para la Duplexación por División en Frecuencia (FDD), lo que conlleva a un espectro de uso mucho más amplio. Otros de los grandes beneficios que proporcionaría el uso de MIMO Masivo frente al MIMO "tradicional" son el uso de componentes electrónicos baratos, el acceso a una latencia altamente reducida, una simplificación de la capa del Control de Acceso al Medio (MAC) y una mejora en la robustez frente a interferencias [77].

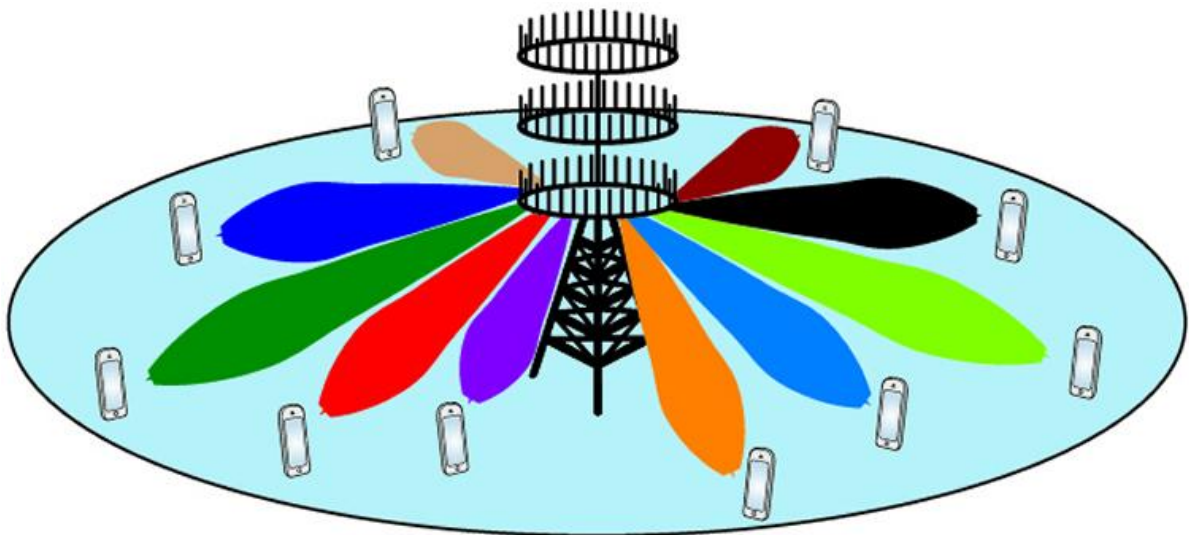


Figura 27: Escenario con MIMO Masivo [78]

6.3 Contaminación de Pilotos

Parte de los inconvenientes a tener en cuenta y a mejorar de la aplicación de esta práctica de MIMO Masivo son los siguientes:

- Reducción del consumo energético ya que se puede disparar al usar más antenas.
- Lograr una sincronización y un *handover* efectivo para nuevos dispositivos.
- Localización de nuevos escenario de despliegue para los nuevos sistemas de antenas.
- Combatir la contaminación de los pilotos de estimación del canal.

En este trabajo se ha centrado el estudio del problema de la contaminación de pilotos, cuya característica va ligada al uso de sistemas de MIMO Masivo y se trata de un fenómeno patente en los escenarios bajo la acción de interferencias.

El problema de la contaminación de pilotos reside en:

Se tiene una estación base en el centro de un celdas virtual donde un terminal desea establecer una conexión con este por lo que en un entorno ideal se enviarían señales piloto en *uplink* (desde el terminal móvil a la estación base) para estimar el canal de manera correcta. En MIMO Masivo se utiliza una secuencia de señales piloto organizadas de forma ortogonal por lo que al recibirse en la estación base podrían obtenerse sin problema mediante la operación base opuesta. El problema reside en el momento que se comienza a disponer de terminales en celdas adyacentes que a su vez transmiten las señales portadoras con la misma secuencia ortogonal que el terminal móvil que se encontraba en la celda principal, produciendo así graves interferencias y contaminando los pilotos enviados y no permitiendo la correcta estimación del canal por parte del receptor, haciendo así una detección errónea al no poder la estación base separar las dos señales.

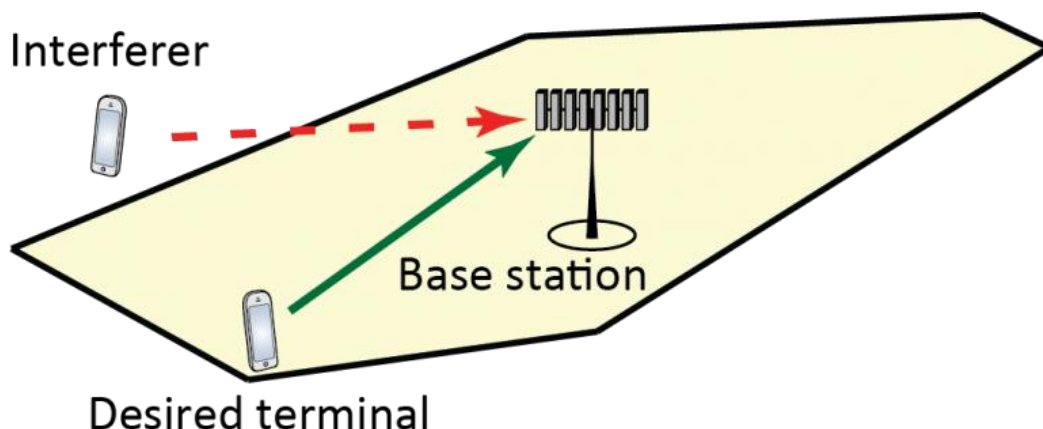


Figura 28: Diagrama Terminal Interferente - Deseado en Celda [79]

En la siguiente imagen se puede observar el fenómeno de la interferencia y la superposición causada de ambas señales en la estación base. La interferencia está marcada en color rojo de manera más pequeña que la señal del terminal deseado al interferir con menos potencia que la señal deseada, la cual está dentro de la celda y del radio de actuación de la estación base de la celda.

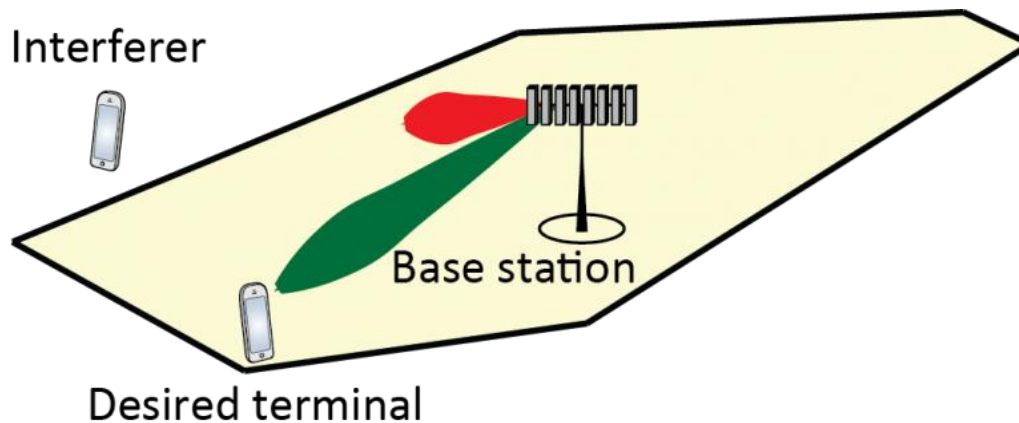


Figura 29: Interferencia Producida por Terminal en Celda Adyacente [79]

Para concluir con el apartado de los principios de la contaminación de pilotos cabe resaltar que este efecto es especialmente perjudicial en los escenarios MIMO con M antenas, donde M es un número elevado, al ser la ganancia de array un incremento proporcional a M .

7. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA OFDM CON MIMO MASIVO IMPLEMENTADO

En este capítulo se va a proceder a describir el sistema OFDM con MIMO Masivo implementado en MATLAB® con un total de 16 antenas en transmisión y 64 antenas en recepción, desde la creación de una secuencia de bits de información a enviar, simulando una transmisión con la técnica de MIMO y recibiendo esa secuencia de bits en un receptor tras su correcta demodulación. Se ha decidido usar MATLAB® para la implementación por su alta capacidad de modelado con matrices y vectores, que para el diseño de un sistema de transmisión OFDM-MIMO es necesario el uso de sistemas matriciales.

Para comenzar con la descripción del sistema cabe mencionar que se ha dividido el programa en varios módulos para su sencillez de entendimiento. Los módulos creados se mencionan a continuación:

1. Programa principal: se realiza la ejecución del programa donde, en él, se producen las diversas llamadas a otras funciones. En este programa se establecen los parámetros principales de la ejecución, como son: SNR, ancho de banda (BW), número de subportadoras, número de subportadoras pilotos, número de antenas transmisoras/receptoras, longitud del preámbulo... etc.

En este módulo principal se ha programado un comportamiento de manera que se cree y se transmita un paquete a través de un sistema multiantena en un canal que simula a los canales reales. Primero se establecen todos los parámetros, se generan los canales y posteriormente se inicializan las variables. Una vez inicializadas las variables se procede a hacer la llamada a los diferentes módulos para su transmisión.

2. Módulos de funciones auxiliares: En estos módulos se han generado diferentes archivos de funciones que son usadas desde el fichero del programa principal. Estas funciones actúan como cada una de las cajas del diagrama de bloques de forma individual. Tenemos las siguientes:

- Modelado del canal: Es un módulo de función que se encarga de generar canales con desvanecimiento Rayleigh (*fading channels*) independientes devolviendo sus correspondientes caminos donde se tienen en cuenta numerosos factores/parámetros, como el número de *taps* del filtro Doppler y los parámetros de modelo de canal SUI-3, que será el modelo aplicado.

- Función Modulador: Se trata de una función que actúa como el modulador coherente devolviendo la señal a transmitir.

- Canal AWGN: Es la función donde se genera y simula el canal con ruido aditivo blanco y Gaussiano por donde los bits enviados pasan y se ven afectados por los efectos del mismo.

- Función Demodulador: Se trata de una función que actúa como el demodulador coherente devolviendo los bits recibidos tras un proceso de estimación del canal, de igualación y finalmente de demodulación.
- Estimación de BER y MSE: En estos módulos se produce la estimación del MSE (Error Cuadrático Medio) y de la BER (*Bit Error Rate*).

1. Modelo del sistema implementado sin interferencias.

Como se comentó en el capítulo 6 de MIMO Masivo, se ha decidido implementar el sistema MIMO con multiplexado espacial, lo que conlleva una mayor tasa de transmisión, aunque empeora la BER. El flujo de bits entra en el transmisor y cada antena envía una porción de información diferente en paralelo donde cada porción se recibe en todas las antenas receptoras.

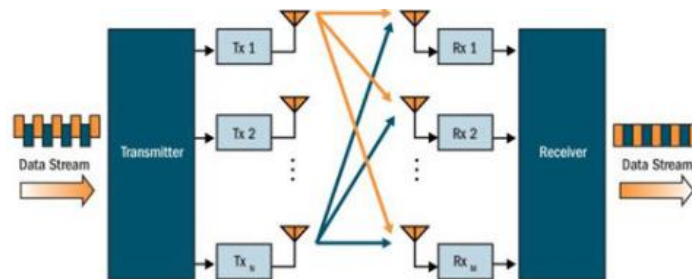


Figura 30: Diagrama de Multiplexado Espacial [80]

En los siguientes puntos se muestran figuras de los diagramas de bloques del sistema (transmisor, canal y receptor) donde se explicará la implementación realizada:

a) Transmisor

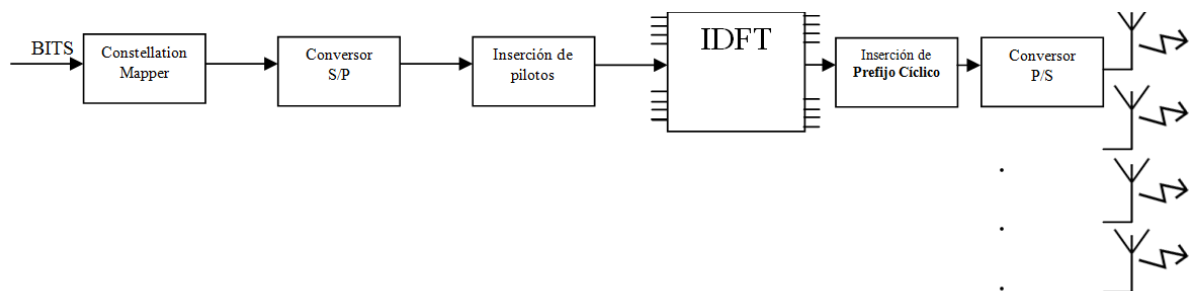


Figura 31: Diagrama de Bloques del Transmisor

Se ha diseñado un programa flexible donde se pueden modificar todos los parámetros del mismo para realizar diversas simulaciones. Los parámetros a establecer y modificar son los siguientes: SNR de las celdas, el Ancho de Banda, número de subportadoras, número de subportadoras de la secuencia piloto, número de bits por símbolo, número de símbolos OFDM por *frame* enviado, el *path loss* en cada celda (para la implementación con contaminación de pilotos), y el número de antenas transmisoras y receptoras donde

se ha establecido un sistema de MIMO Masivo con 16 antenas transmisoras (M_t) y 64 antenas receptoras (M_r) para un ancho de banda de 2 MHz con 64 subportadoras y 4 subportadoras en pilotos (tiene que cumplir la condición de que el número de pilotos N_{pil} sea menor que N , $N_{pil} < N$).

La modulación elegida ha sido la PSK (modulación por desplazamiento de fase) donde, al poder elegir el número de bits por símbolo en el programa se han elegido 2, por lo que la modulación aplicada es una Q-PSK y la codificación se realiza acorde con la Codificación Gray como se puede observar en la siguiente figura con los ángulos de fase: 0 , $\pi/2$, $3\pi/4$ y π .

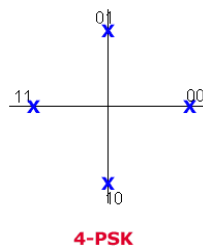


Figura 32: Esquema Complejo de la Modulación Q-PSK (o 4-PSK). [81]

Partiendo del diagrama de bloques del transmisor la ejecución comienza creando bits aleatorios de ceros y unos. Posteriormente el flujo de bits atraviesa el módulo donde se mapea la constelación Q-PSK elegida generando los símbolos complejos.

El siguiente módulo que atraviesan los símbolos es el conversor Serie-Paralelo cuyo objetivo es transmitir la información que está en serie en diferentes portadoras (en nuestro caso 64 portadoras); de esta manera se consigue también incrementar el periodo de los símbolos.

Posteriormente, se procederá a la inserción de los pilotos (conocido como preámbulo), para estimar el canal en el receptor, y a la inserción de los datos. Este proceso se realiza de forma paralela cuyo objetivo consiste en construir un paquete, o *frame*, con los pilotos y los datos a transmitir. A los pilotos y a los datos, que se encuentran en el dominio de la frecuencia de forma discreta se les aplica la Transformada Inversa Rápida de Fourier (IFFT) por separado. En el caso de los datos, al tener 64 subportadoras (cada una "transporta" un símbolo), se le aplica la IFFT a las 64 subportadoras en frecuencia (f_0, f_1, \dots, f_{63}) para convertir los datos complejos en muestras de señal modulada multiplexada en dominio del tiempo. Se asume una ortogonalidad perfecta entre portadoras (cumpliendo el principio de ortogonalidad) donde los picos de las subportadoras anulan a las siguientes evitando la ICI; en los transmisores reales puede haber cierto solapamiento de subportadoras que requieren una sincronización.

Por otro lado, se procede de la misma manera a la IFFT de las 4 subportadoras de los pilotos, que se distribuyen de manera equitativa entre las posiciones de las 64 subportadoras de los datos de la forma: f_0, f_{15}, f_{31} y f_{63} . Insertados de esta forma en la

rejilla tiempo-frecuencia donde los primeros símbolos OFDM de la rejilla son los pilotos (en sus posiciones correspondientes) y los siguientes símbolos OFDM serán de los datos; en nuestro caso son 20 por predefinición en los parámetros del número de símbolos de datos por frame.

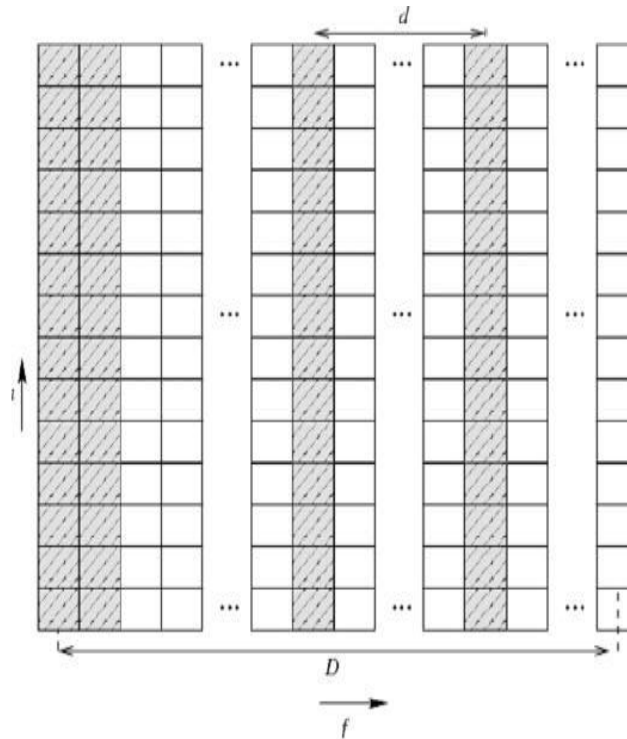


Figura 33: Distribución de Señales Piloto en la Rejilla Tiempo/Frecuencia [82]

Al comienzo de los símbolos OFDM se le añade un Prefijo Cíclico que sirve de intervalo de guarda, duplicando las últimas muestras de los símbolos OFDM tras haber pasado por la IFFT para solucionar el retardo (*delay spread*) producido por el canal multitrayecto. En el caso de esta simulación se ha elegido el modelo de canal SUI-3, donde el número discreto de taps de retardo de canal es de tres por lo que el PC es de longitud dos para paliar el efecto del ISI en el entorno con selectividad en frecuencia.

Una vez que el PC se ha añadido a cada símbolo ya ha quedado construido el *frame* que está formado por los símbolos OFDM pertenecientes a los pilotos más los 20 símbolos OFDM de datos con sus correspondientes prefijos cíclicos. El *frame*, que queda formado por el símbolo OFDM de los pilotos más el prefijo cíclico (4+2 subportadoras) y por los símbolos OFDM de datos (20*(64+2)) finalmente atravesaría un conversor Paralelo-Serie para, a través de una de las antenas del sistema de transmisión, ser propagado en forma de onda por el canal.

Al estar en un sistema con MIMO Masivo con numerosas antenas y para que, en el receptor, no se solapen las numerosas señales que salen de las M_t antenas con los *frames* que recibe de cada M_r antena a la hora de demodular la señal (sumatorio de todas las señales recibidas), se utiliza en el preámbulo una secuencia ortogonal donde se

encuentran los pilotos para, una vez en recepción, poder ser detectadas de manera efectiva tras realizar la operación de detección ortogonal y así extraer la información correcta.

Tras observar la siguiente figura de un sistema MIMO genérico con un número N de antenas y su matriz de canal, se puede observar el gran número de señales provenientes de diferentes canales que se superponen en cada antena receptora, tantos como antenas estén transmitiendo y por ello, surge la necesidad de añadir en el preámbulo dicha secuencia ortogonal, que en el sistema se aplicará con una matriz Hadamard en correspondencia con las dimensiones de la antena transmisora del sistema usado.

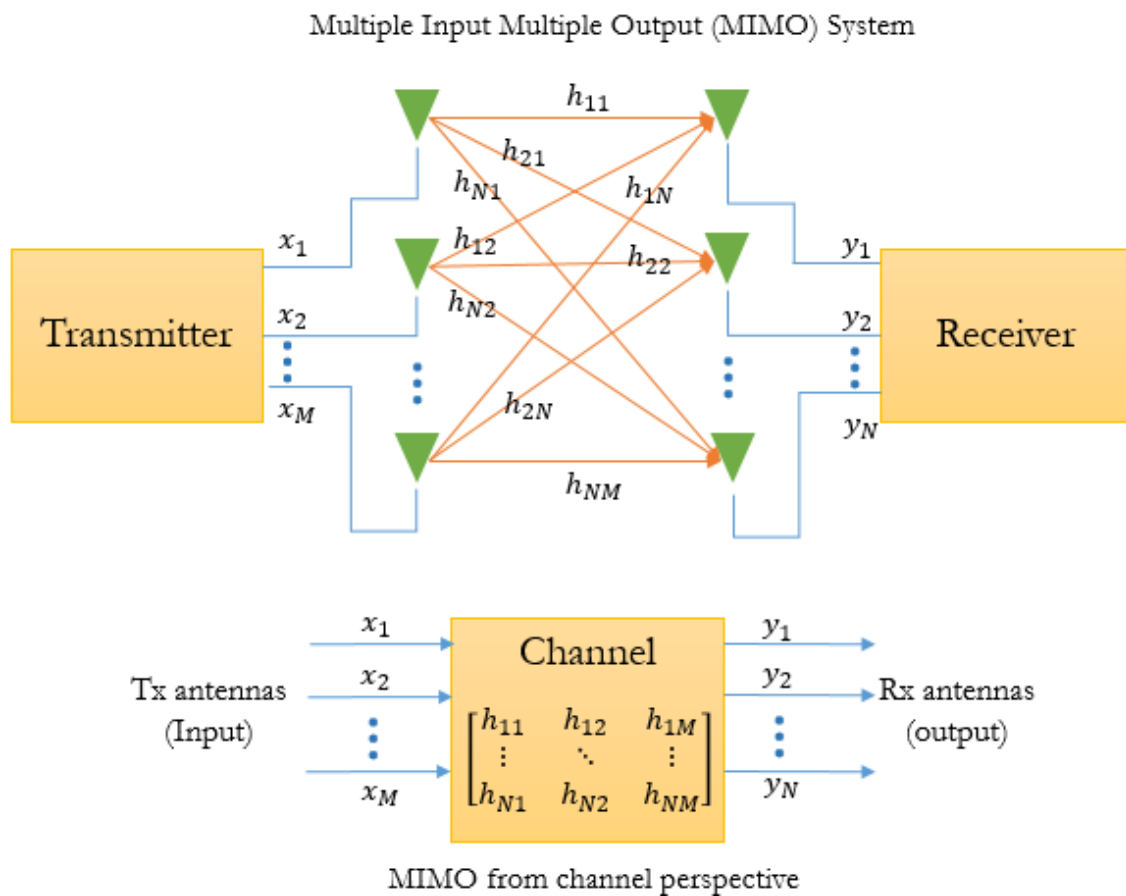


Figura 34: Esquema MIMO desde la Perspectiva del Canal [83]

$$\begin{aligned}
 y_1 &= h_{11}x_1 + h_{12}x_2 + n_1 \\
 y_2 &= h_{21}x_1 + h_{22}x_2 + n_2
 \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix}$$

Figura 35: Matriz Resultante de MIMO para Sistema 2x2 [83]

La matriz Hadamard se trata de una matriz cuadrada de dimensión igual al número de antenas transmisoras (M_t) cuyos elementos son números uno normalizados positivos y negativos y cuyas filas son mutuamente ortogonales. Esta matriz cobra especial relevancia en el apartado del modelo implementado con interferencias que se explicará más adelante.

b) Canal

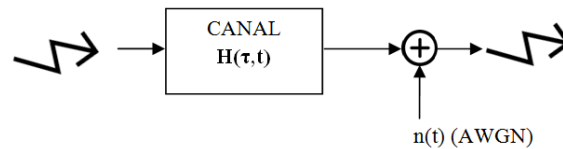


Figura 36: Diagrama de Bloques del Canal

Una vez formado el *frame* se dispone a transmitirlo por el canal, en el dominio del tiempo. El modelado se ha fijado estableciendo los parámetros que el modelo de SUI-3, de la Stanford University Interim, establece para escenarios terrenales introducidos por el modelo Erceg. Este modelo establece que el desvanecimiento por multitrayecto se fija en 3 *taps* no uniformes y una distribución Ricean para las ganancias con frecuencia máxima de Doppler y suponiendo que los transmisores y los receptores están en Línea de Visión Directa (*LOS - Line Of Sight*). Además, en el canal se añade ruido AWGN, aditivo blanco y Gaussiano, simulado que sus valores de señal en diferentes instantes no tienen correlación ninguna entre ellos y cuya f.d.p (función de densidad de probabilidad) corresponde a una distribución normal.

Los canales creados para cada transmisión son independientes entre sí y la operación usada para aplicar los efectos del canal a la señal es la convolución con la respuesta al impulso del mismo más el ruido AWGN que, al transmitirse en el dominio del tiempo es necesaria esta operación. En el dominio de la frecuencia se trata de un producto de señales; como se muestra a continuación la señal total a recibir:

$$R(k) = S(k) * H(k) + W(k)$$

En el canal del sistema implementado se ha tenido en cuenta el desvanecimiento en bloque, más conocido como *Block Fading*, donde establece que en cada instante temporal τ las condiciones del canal cambian, por lo que se tendrán respuestas al impulso distintas de propagación multitrayecto en cada envío temporal de información por cada antena. De esta forma, el sistema tiene una variable que se asemeja a la realidad en el canal modelado.

c) Receptor

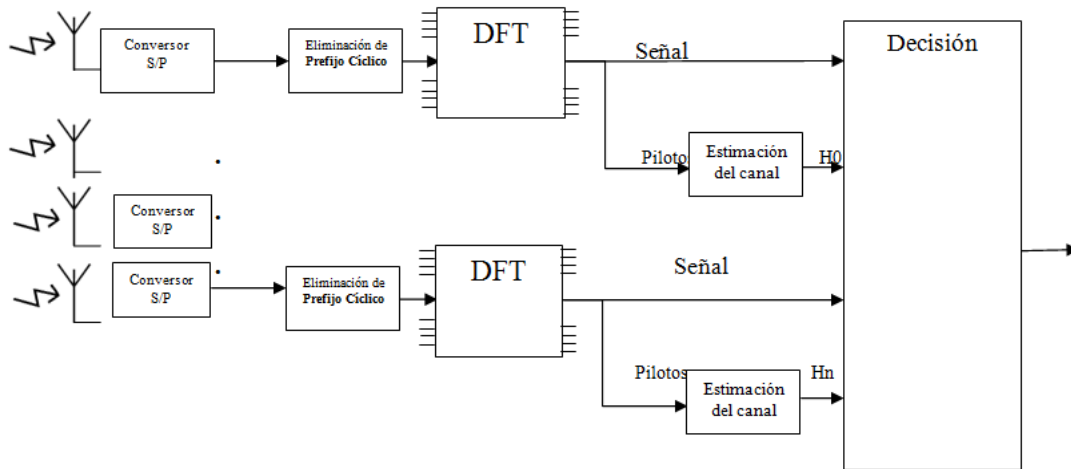


Figura 37: Diagrama de Bloques del Receptor

Al tratarse de un sistema MIMO con multiplexado espacial, todas las antenas receptoras recibirán datos de cada antena transmisora y, cada señal, habrá sido afectada por el canal de forma diferente por lo que una de las características es la mejora en tasa binaria. Una vez que se reciben las señales a las antenas receptoras se convierten de serie a paralelo como se hizo en el modulador. Posteriormente, se procede a eliminar el Prefijo Cíclico de las muestras recibidas ya que en este sistema se ha asumido una sincronización perfecta en tiempo y frecuencia y no es necesaria la sincronización.

Se procede a realizar la Estimación del Canal para la posterior detección de la señal transmitida. Para realizar este módulo previamente se ha aplicado la DFT de las 64 subportadoras al preámbulo una vez que el PC se ha eliminado y a continuación se dividirá la estimación en dos partes:

1. La primera consiste en estimar con el método de Mínimos Cuadrados (*Least Squares*) en las posiciones de las subportadoras de pilotos (las 4 subportadoras de pilotos) mediante el cálculo de la operación de la pseudoinversa con el preámbulo con los pilotos en dominio de la frecuencia y como resultado una estimación del canal con un pequeño error de estimación añadido como se muestra en la siguiente ecuación.

$$\hat{H}(k) = \frac{R(k)}{P(k)} = \frac{P(k) * H(k) + W(k)}{P(k)} \cong H(k) + \Delta H(k)$$

Una vez realizada la estimación del canal en las posiciones de los pilotos se procede a realizar la estimación para las posiciones de las 64 subportadoras de cada símbolo OFDM.

Debido a que se han estimado hasta este punto las 4 subportadoras de los pilotos pero tenemos $N=64$ subportadoras de información se tiene que realizar la operación de interpolado por el método de *Zero-Padding* temporal, que consiste en completar con ceros las muestras temporales del canal estimado tras previamente realizar la IDFT para operar en el dominio del tiempo. Una vez aplicado este método se procede a aplicar la DFT de nuevo ya que por características de la Transformada Discreta de Fourier la interpolación con funciones *Sinc* se hace efectiva. En MIMO Masivo, al disponer de más antenas en recepción que en transmisión por la regla impuesta de $M_r > M_t$, se obtienen los datos procediendo a la correcta separación correspondiente a cada antena transmisora en la recepción.

2. Una vez realizado el proceso de Interpolado se procede al de Ecuación, que consiste en corregir el efecto que genera el canal en forma de modificación no deseada en la amplitud de cada subportadora. Los métodos de ecuación más utilizados son *MMSE* y *Zero-forcing*; el que se ha decidido usar en el sistema es el método de *Zero-forcing*. En la siguiente figura se puede observar el proceso que lleva a la ecuación a obtener la información deseada en forma gráfica.

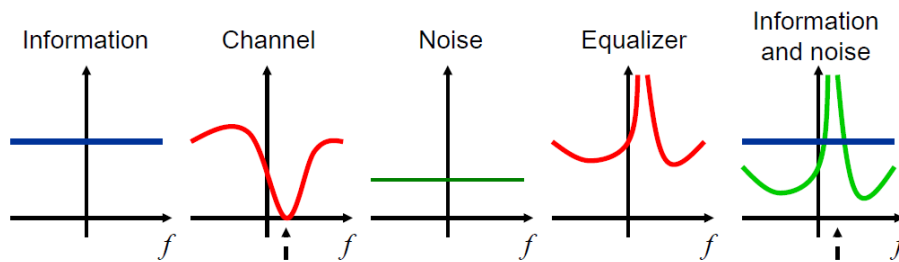


Figura 38: Proceso de la Ecuación de forma Gráfica [84]

En la siguiente ecuación se ve el proceso que sigue el ecualizador, aplicado a cada subportadora, para obtener finalmente la información estimada con la adición de un pequeño error de estimación:

$$\hat{S}(k) = \frac{R(k)}{\hat{H}(k)} = \frac{S(k) * H(k) + W(k)}{\hat{H}(k)} \cong S(k) + \Delta S(k)$$

En la ecuación se puede observar que el proceso ha sido muy similar al de estimación de los pilotos.

El siguiente módulo, el decisor o *slicer*, consiste en partir de la constelación de la señal recibida estimada, $\hat{S}_n(k)$, y del canal estimado por cada antena, $\hat{H}_n(k)$, decidir qué símbolo de la constelación elegida (Q-PSK) está más. En el caso del sistema implementado se incluye el módulo del *Demapper* en el Decisor, que consiste en dar como resultado la secuencia de bits detectados partiendo de los símbolos de la constelación decidida.

Adicionalmente se han añadido funciones de medida al programa donde se pueden observar parámetros y datos como los valores de BER (*Bit Error Rate*) por cada antena, BER del sistema total, MSE (*Mean Square Error*) de la estimación del canal, velocidad de transmisión en bits/seg., duración del *frame* en segundos de la (cabecera+datos) entre otros parámetros.

2. Modelo del sistema implementado con interferencias (con Contaminación de Pilotos).

El sistema implementado se ha aplicado a un entorno de MIMO Masivo sin interferencias de 16×64 y a otro de mismas dimensiones con interferencias y con varios escenarios.

En el sistema de MIMO Masivo sin interferencias se asumía que la transmisión se producía únicamente en una celda hexagonal con una estación base situada en el centro de la celda y una estación móvil dentro de la celda pero situada a cierta distancia de la estación base por lo que no se tenía en cuenta ningún sistema adyacente que pudiera generar interferencias. En esta sección se introducen celdas hexagonales contiguas a la celda principal con sistemas móviles paralelos emitiendo información a la vez que los sistemas en la celda principal por lo que generarán interferencias.

Para simplificación en el lenguaje, estación base se designará como BS (*Base Station*) y estación móvil como MS (*Mobile Station*).

Las interferencias que se introducen en el sistema con MIMO Masivo son específicamente las provocadas por la contaminación de los pilotos de la MS a la BS en orden ascendente (*uplink*) por necesidad de cumplir con la condición de $M_r > M_t$ (Número de antenas receptoras tiene que ser mayor que el número de antenas transmisoras) para la correcta separación de los datos correspondientes de cada antena transmisora en la recepción. En este trabajo se simula una de las soluciones que se están llevando a cabo por numerosos investigadores de la materia para paliar los efectos negativos que la contaminación de pilotos tiene en las transmisiones. La solución consiste en que las celdas contiguas a la celda hexagonal principal (donde se realizan las medidas) tengan una secuencia ortogonal de pilotos de la misma manera que la MS establece una secuencia ortogonal para detectar los pilotos de cada antena.

En la siguiente imagen se puede observar con un código de colores el uso de secuencias ortogonales distintas o iguales a las de las celdas contiguas donde en la figura de la izquierda se observan todas las celdas de un mismo color, en este caso amarillo, lo que quiere decir que cada celda usa la misma secuencia ortogonal en los pilotos que, como se verá en el apartado de simulaciones, provocará grandes interferencias haciendo una estimación errónea. A esta configuración se le llama factor de Reuso-0, "*Reuse-0*" en inglés, ya que no tiene factor de reuso de secuencia ortogonal.

En la figura del centro se observa que, tomando una celda amarilla como principal, las celdas que la rodean se intercambian de patrón de colores en rojo y verde, lo que quiere decir que el rojo, verde y amarillo no se ven interferidas ya que las secuencias usadas en los pilotos de estos tres tipos de celdas son ortogonales entre sí produciendo teóricamente una mejor estimación ya que los pilotos serían detectables. A esta configuración se le llama factor de Reuso-2, "*Reuse-2*" en inglés.

La figura de la izquierda se basa en el mismo concepto que en la figura del centro pero se le añade un tipo de celda más (azul), lo que haría una secuencia ortogonal más grande pero habría menos posibilidad de interferencia debido a la mayor cantidad de tipo de celdas contiguas diferentes (tres tipos en este caso frente a dos tipos en el anterior). A esta configuración se le llama factor de Reuso-3, "*Reuse-3*" en inglés.

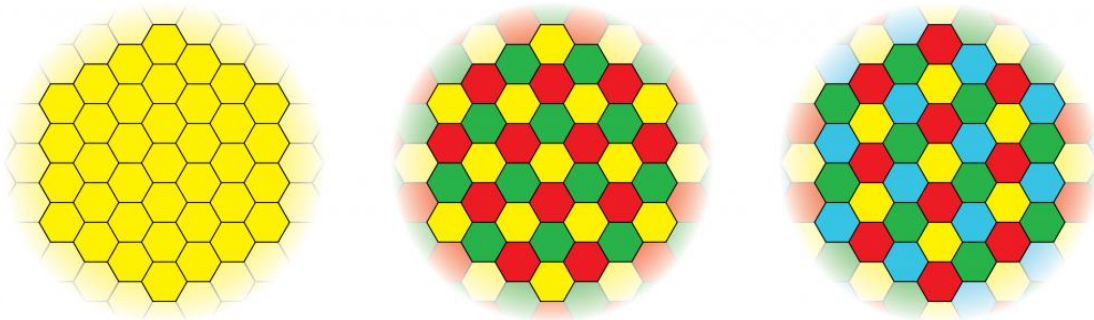


Figura 39: Red Celular con Diferentes Factores de Reuso [85]

En el sistema de MIMO Masivo de este trabajo se han implementado escenarios para tratar de simular el factor de Reuso para diferentes casos, y son los siguientes:

Escenario 0. Sistema MIMO Masivo con una celda contigua a la celda principal y pilotos con misma secuencia ortogonal (Reuso-0). Señal principal marcada con flecha roja y señal interferente representada con flecha(s) azul(es).

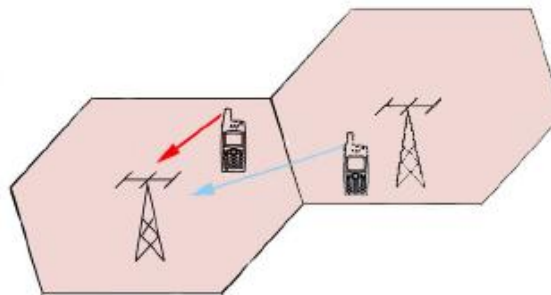


Figura 40: Red Celular con una Celda Interferente

Escenario 0A. Sistema MIMO Masivo con seis celdas contiguas y pilotos con misma secuencia ortogonal.

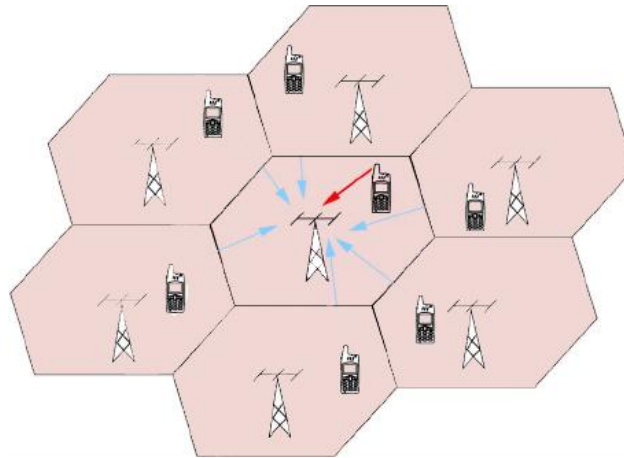


Figura 41: Red Celular con seis Celdas Interferentes

Escenario 1A. Sistema MIMO Masivo con una celda contigua y pilotos con secuencia ortogonal distinta (Reuso-1).

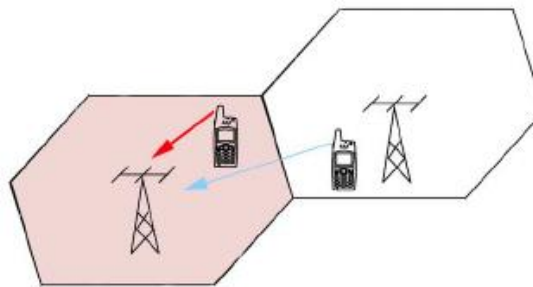


Figura 42: Red Celular con una Celda Interferente (con Secuencia Ortogonal)

Escenario 1B. Sistema MIMO Masivo con dos celdas contiguas y pilotos con secuencia ortogonal distinta a la de la celda principal pero con la misma entre ellas (Reuso-1).

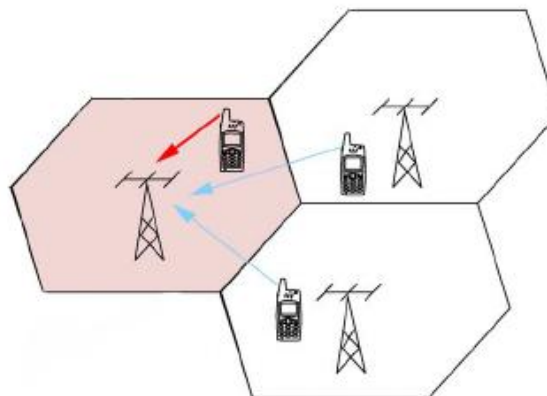


Figura 43: Red Celular con dos Celdas Interferentes (con Secuencias Ortogonales del Mismo Tipo)

Escenario 1C. Sistema MIMO Masivo con seis celdas contiguas y pilotos con secuencia ortogonal distinta.

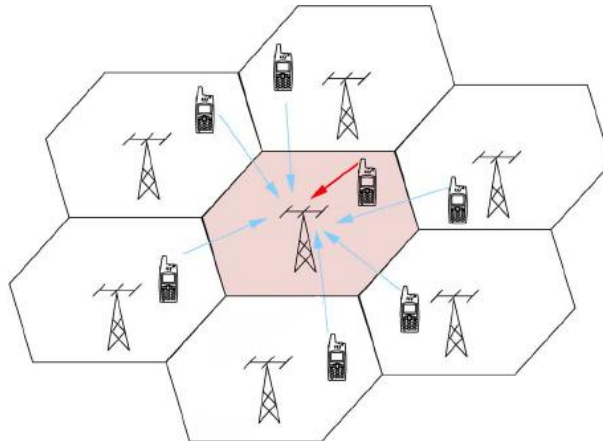


Figura 44: Red Celular con seis Celdas Interferentes (con Secuencias Ortogonales del Mismo Tipo)

Escenario 2. Sistema MIMO Masivo con dos celdas contiguas y pilotos con secuencia ortogonal distinta entre las tres celdas totales (Reuso-2).

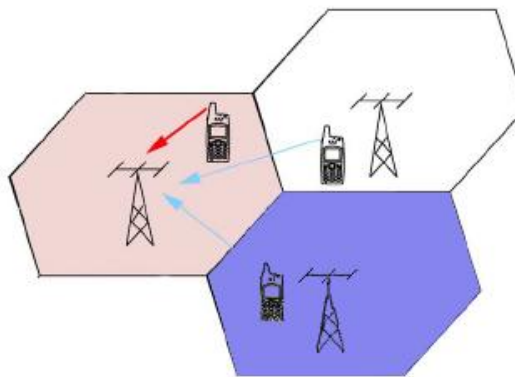


Figura 45: Red Celular con dos Celdas Interferentes (con Secuencias Ortogonales de Distinto Tipo)

Escenario 2B. Sistema MIMO Masivo con seis celdas contiguas y pilotos con secuencia ortogonal intercambiante como en escenario 2.

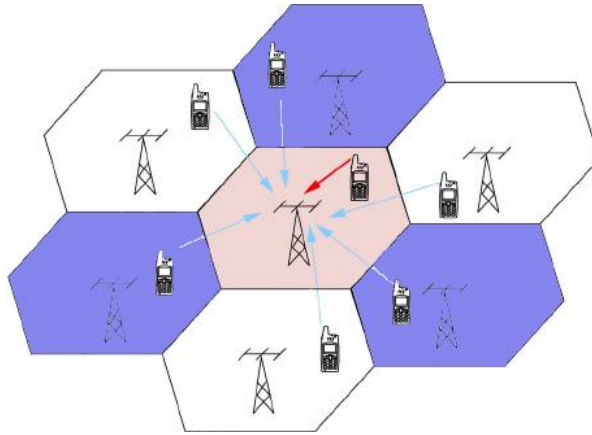


Figura 46: Red Celular con seis Celdas Interferentes (con Secuencias Ortogonales de Distinto Tipo)

Para la implementación de todos estos escenarios ha sido necesaria la modificación de varios elementos, el cambio más importante reside en la construcción del preámbulo, ya que es en ese paso donde se produce la adición de los pilotos mediante la secuencia ortogonal mediante el uso de la matriz Hadamard. Se ha creado un sistema de transmisión MIMO 16×64 paralelo que envía diferente información a través de un canal diferente al de la celda principal. En el receptor de la BS de la celda principal se reciben señales de ambas MS (la principal y la interferente) como una combinación lineal de ambas señales.

Para la construcción del preámbulo del Escenario 0 no ha hecho falta ninguna modificación ya que el MS de la celda adyacente por ser Reuse-0 usa la misma secuencia ortogonal que la celda principal, por lo que se reutilizaría la misma matriz Hadamard de dimensión 16×16 usada por el MS en la celda principal.

Para el Escenario 1 (1A, 1B y 1C), con Reuse-1, el preámbulo de la MS de la celda interferente cambia y se pasa de usar una matriz Hadamard 16×16 a generar una de 32×32 donde para construir los dos preámbulos de cada uno de los dos transmisores MS se dividirá la matriz hadamard en dos, donde para la primera submatriz se cogerán las primeras 16 filas con las 32 columnas para construir el primer preámbulo y para la segunda submatriz se cogerán las siguientes 16 filas con sus 32 columnas correspondientes para construir el segundo preámbulo. De esta forma los pilotos de ambos transmisores tendrán secuencias ortogonales y se podrá estimar el canal de cada uno evitando en gran medida, la contaminación de los pilotos.

Ocurre lo mismo en el Escenario 2 que en el Escenario 1 que, aunque al ser tres celdas con 3 transmisores su matriz Hadamard para la construcción de los tres preámbulos se ve escalada a una matriz cuadrada de dimensión $3 \times M_t(16) = 48$ al haber tres sistemas transmisores con $M_t = 16$ antenas cada uno. Se tratará de una matriz Hadamard de 48×48 donde la construcción de los tres preámbulos se realizará dividiendo la matriz anterior en tres matrices extraídas por filas de la 48×48 . Las matrices extraídas serán de

dimensiones 16×48. El código de colores corresponde, como se ha podido observar, a las diferentes secuencias ortogonales obtenidas de la matriz Hadamard.

A medida que el factor de Reuso aumenta, la degradación de la señal principal debería disminuir ya que se vería menos afectada por una contaminación en sus pilotos.

En la siguiente figura se puede observar un sistema celular completo donde una celda se ve interferida por otra con la misma secuencia ortogonal de pilotos a cierta distancia. La distancia es un factor importante a tener en cuenta ya que, dependiendo de a qué distancia esté situado el MS interferente, la interferencia y contaminación de pilotos será mayor o menor.

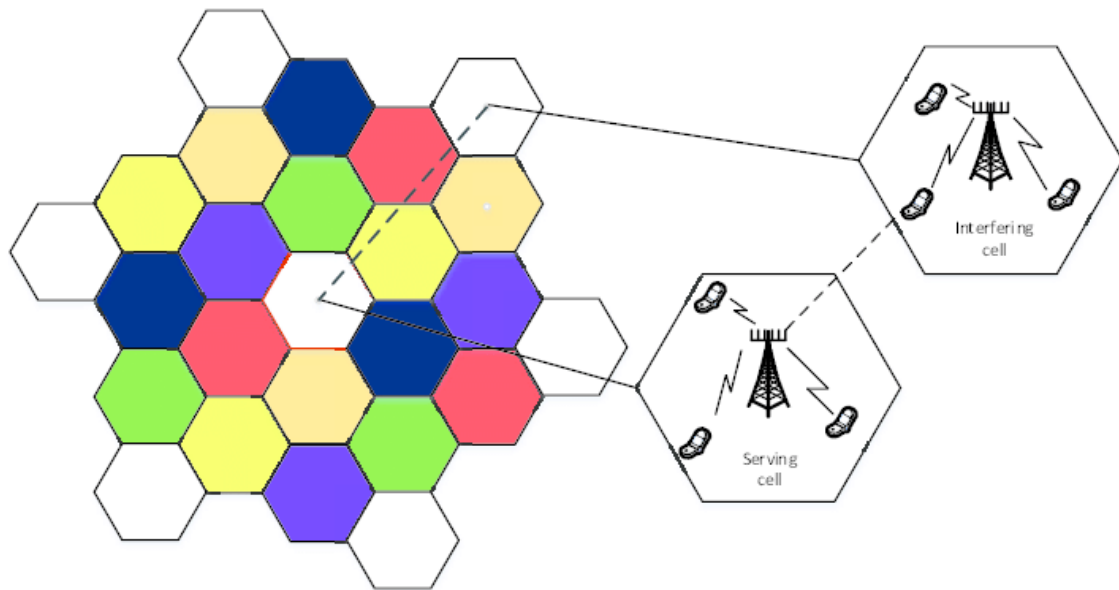


Figura 47: Modelo Celular Hexagonal con Contaminación de Pilotos [86]

En este trabajo se ha modelado la distancia como un factor de pérdida de camino, *path loss*, y la interferencia entre celdas como *CI (cell interference)*, donde se han tenido en cuenta las posibles posiciones del terminal interferente MS.

Dependiendo de la posición del MS interferente dentro de su celda interferirá más o menos en la transmisión de la celda principal. Cuando más cerca de la frontera entre las dos celdas esté, mayor será la interferencia y viceversa cuando más alejado esté el MS interferente a la celda principal (y al MS principal) por lo que se ha buscado un punto medio para modelar la distancia del MS interferente calculada de la siguiente forma:

El modelado del *path loss* que se va a llevar a cabo según la teoría del desvanecimiento a gran escala, *Large-scale fading*, establece que las pérdidas por desvanecimiento de la señal son proporcionales a la distancia:

$$Mean\ path\ loss \propto \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2$$

Las pérdidas por propagación de la señal son directamente proporcionales a $(d)^2$ por lo que $\frac{L_2}{L_1} = \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2$; Las pérdidas de la señal interferente (L_2) por lo tanto son igual a $L_2 = L_1 * \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2$ expresado en potencia, por lo que en señal sería: $L_{2s} = L_{1s} * \sqrt{\left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2}$.

En la siguiente imagen se puede observar más fácilmente a que distancias se corresponden (d_1) y (d_2), donde la flecha roja corresponde al camino de la señal deseada y la negra la señal interferente.

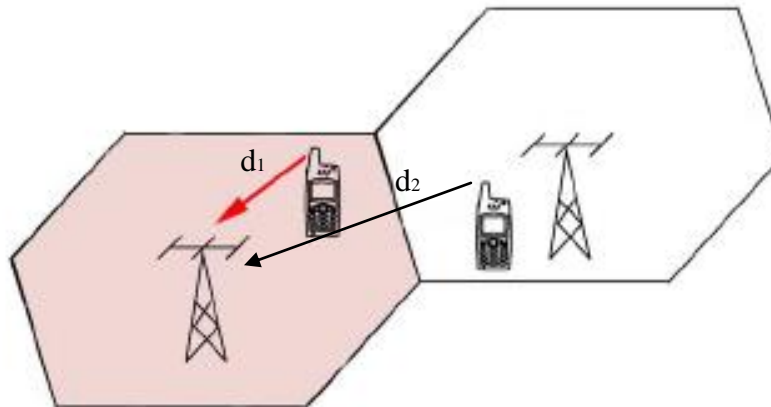


Figura 48: Red Celular con Celda Contigua Interferente y MS Interferente a Cierta Distancia

Para modular las pérdidas por distancia de la señal interferente y su factor CI se ha decidido tomar un caso intermedio donde el MS interferente no está ni muy alejado de la célula principal (mejor caso) ni en la frontera con ella (peor caso posible) por lo que se ha elegido el caso genérico donde $d1=100m$ y $d2=150m$ donde, tras aplicar los cálculos previamente descritos, tenemos un factor CI de $\left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2 = 0,44$ en potencia por lo que sería $CI = \sqrt{\left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2} = 0,66$, donde tomaremos $CI=0,6$ en atenuación de la señal interferente que será el aplicado en las simulaciones.

8. SIMULACIÓN Y RESULTADOS

En este capítulo se procede a la simulación de los distintos escenarios con distintos factores de reuso y CI para posteriormente generar gráficas de rendimiento (BER vs. SNR y MSE vs. SNR) y analizar y evaluar los resultados del efecto de la contaminación de pilotos en las prestaciones del entorno de MIMO Masivo.

Se tomarán las simulaciones con diferentes casos de CI ($CI=0,3; 0,4; 0,5$ y $0,6$), que se corresponden con otras posiciones de los móviles en la celda, y que tendrían menos interferencia.

El valor máximo de CI simulado será $0,6$, ya que usar un CI más alto implica una mayor interferencia del MS interferente y los resultados de rendimiento serán peores (nos interesa estudiar casos donde se minimice la interferencia).

En el caso límite de $CI=0$, esto representa el caso en que no hay señal interferente, por lo tanto no hay contaminación de pilotos, llamado en la leyenda: *W/PC (without Pilot Contamination)*. Esta curva se añade siempre en las gráficas de modo que sirve de referencia como "mejor caso posible".

A continuación se representarán los siguientes escenarios con sus correspondientes gráficas de tasa de error de bit (BER) y de error cuadrático medio (MSE) de la estimación del canal sobre una serie de valores de SNR (relación señal a ruido):

- **Escenario 0.** Sistema con contaminación de pilotos con factor de Reuso-0:

- BER vs. SNR

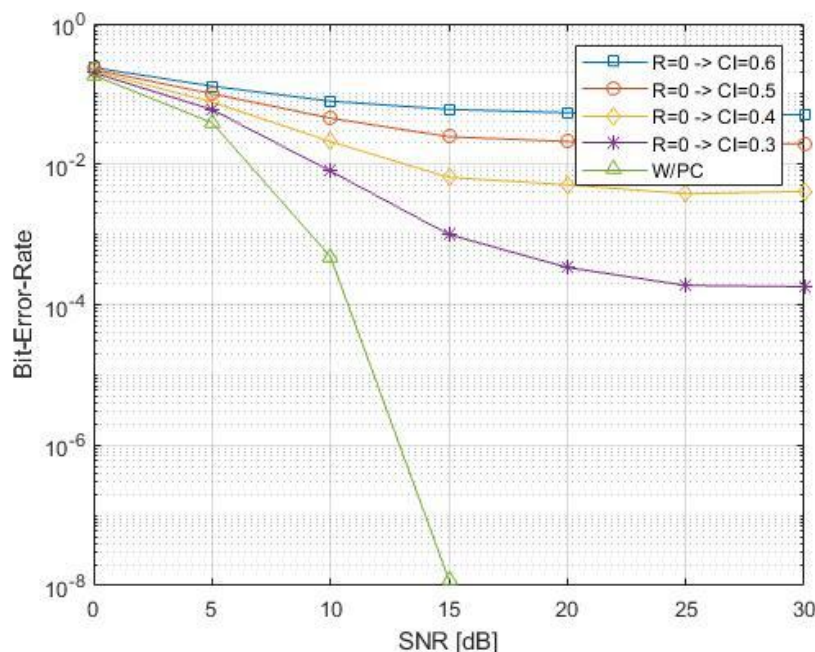


Figura 49: Curvas BER vs. SNR del Escenario 0

- MSE vs. SNR

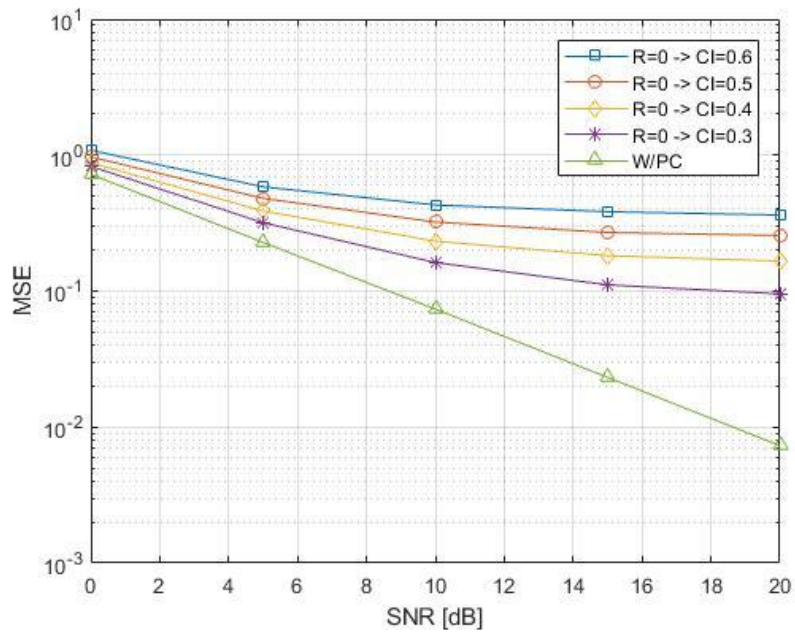


Figura 50: Curvas MSE de la estimación del canal vs. SNR del Escenario 0

- **Escenario 1A.** Sistema con contaminación de pilotos con factor de Reuso-1 (con **una** celda interferente).

- BER vs. SNR

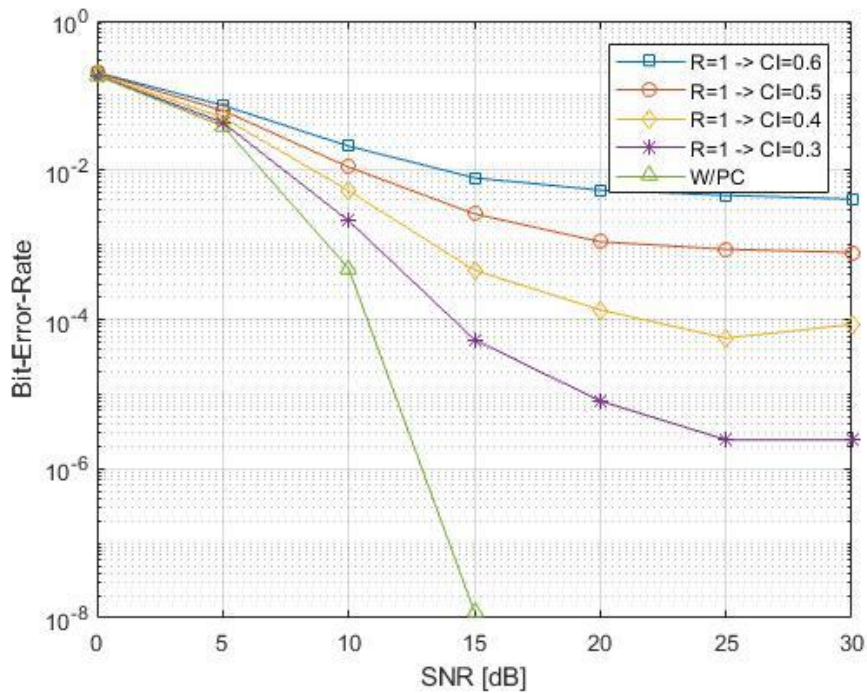


Figura 51: Curvas BER vs. SNR del Escenario 1A

- MSE vs. SNR

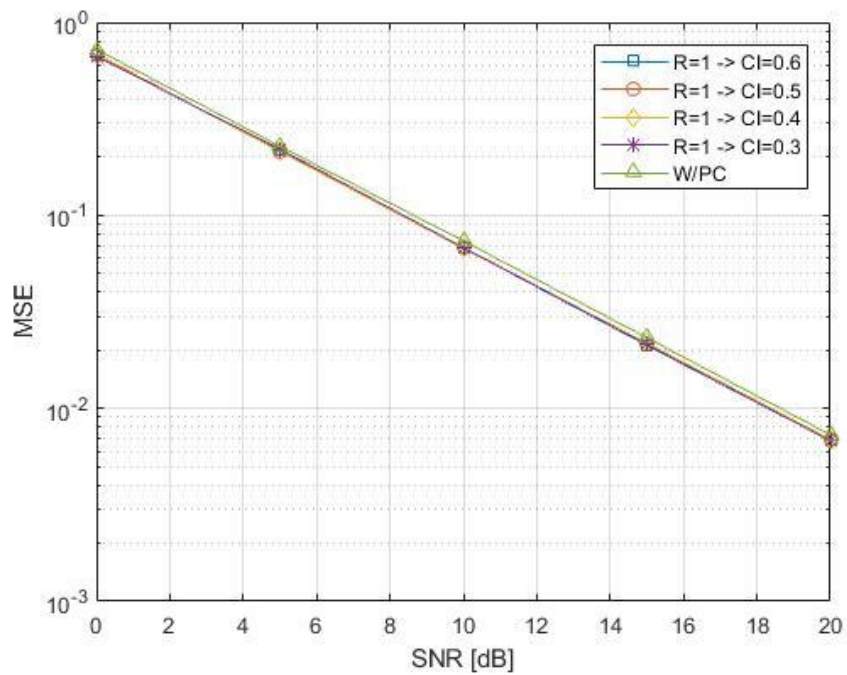


Figura 52: Curvas MSE de la estimación del canal vs. SNR del Escenario 1A

- **Escenario 1B.** Sistema con contaminación de pilotos con factor de Reuso-1 (con dos celdas interferentes).

- BER vs. SNR

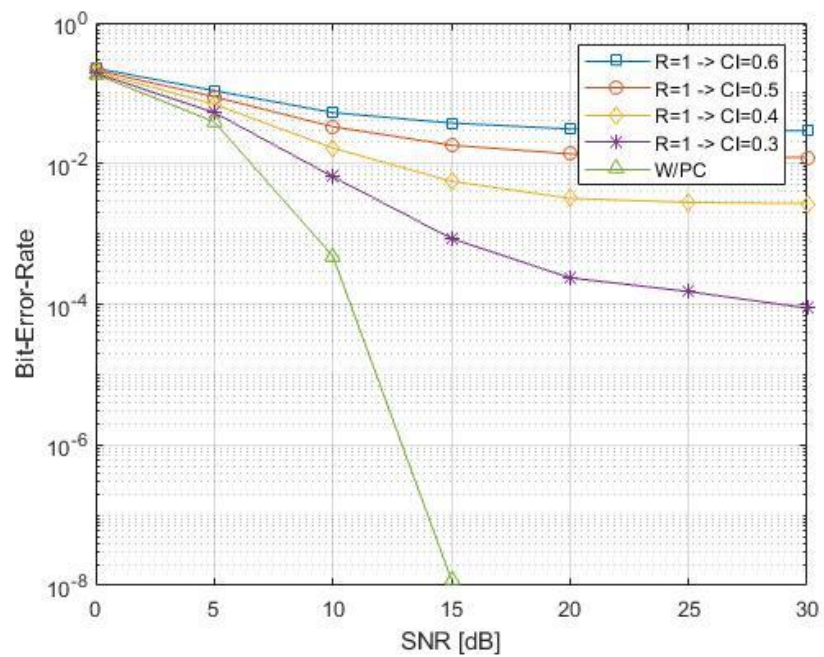


Figura 53: Curvas BER vs. SNR del Escenario 1B

- MSE vs. SNR

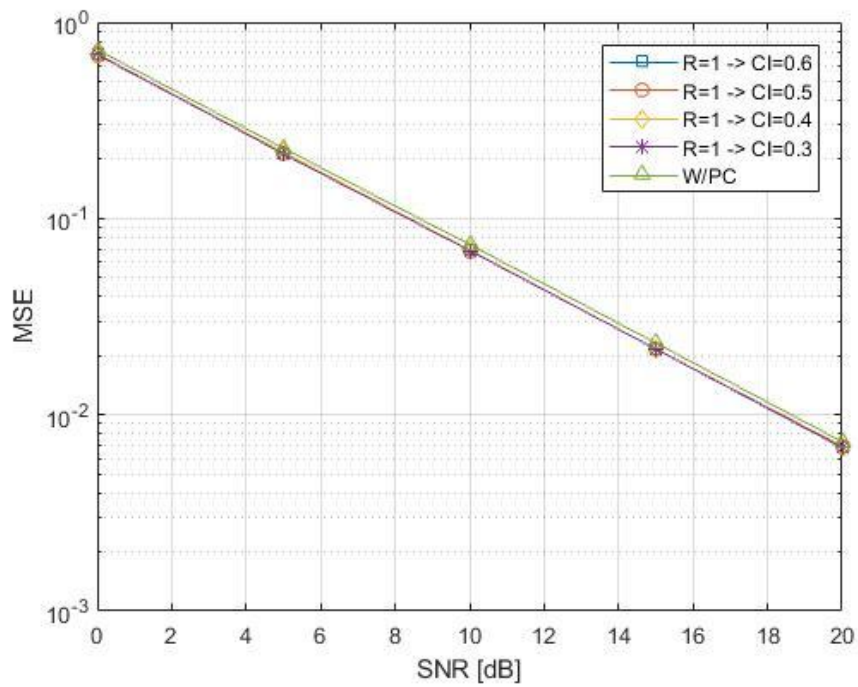


Figura 54: Curvas MSE de la estimación del canal vs. SNR del Escenario 1B

- **Escenario 2.** Sistema con contaminación de pilotos con factor de Reuso-2 (dos celdas interferentes por defecto).

- BER vs. SNR

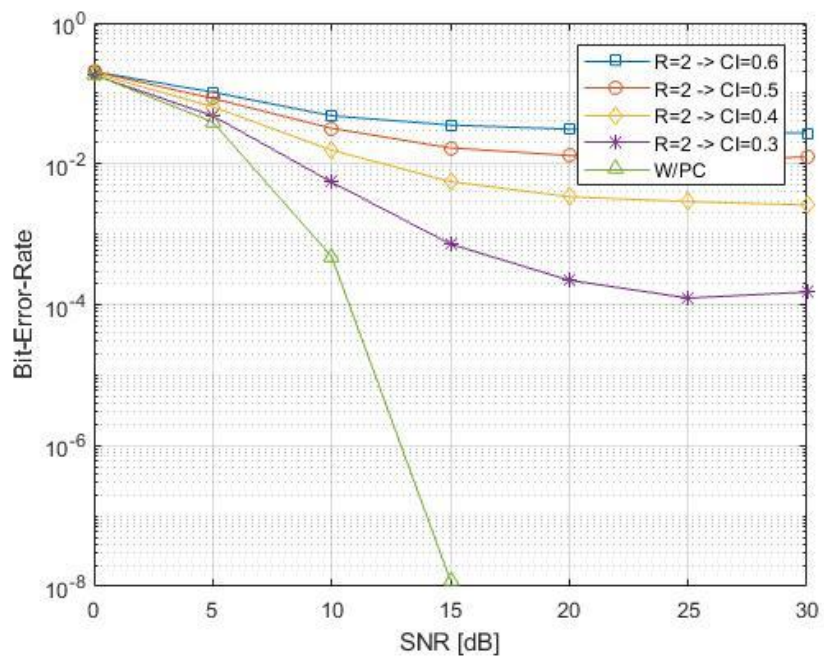


Figura 55: Curvas BER vs. SNR del Escenario 2

- MSE vs. SNR

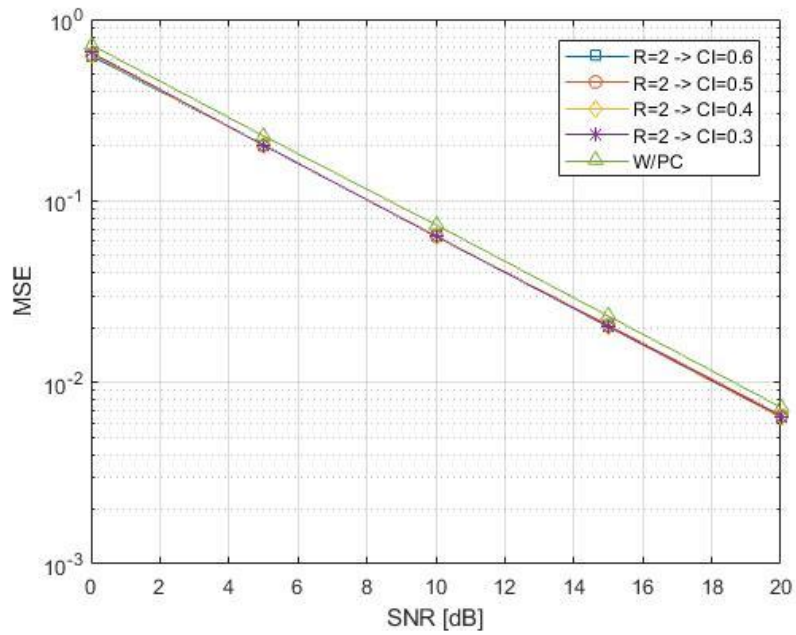


Figura 56: Curvas MSE de la estimación del canal vs. SNR del Escenario 2

- **Comparativa** para factor $CI=0,6$ y $CI=0,3$ de los escenarios con dos celdas (Escenario 0 y 1A):

- BER vs. SNR ($CI=0,6$):

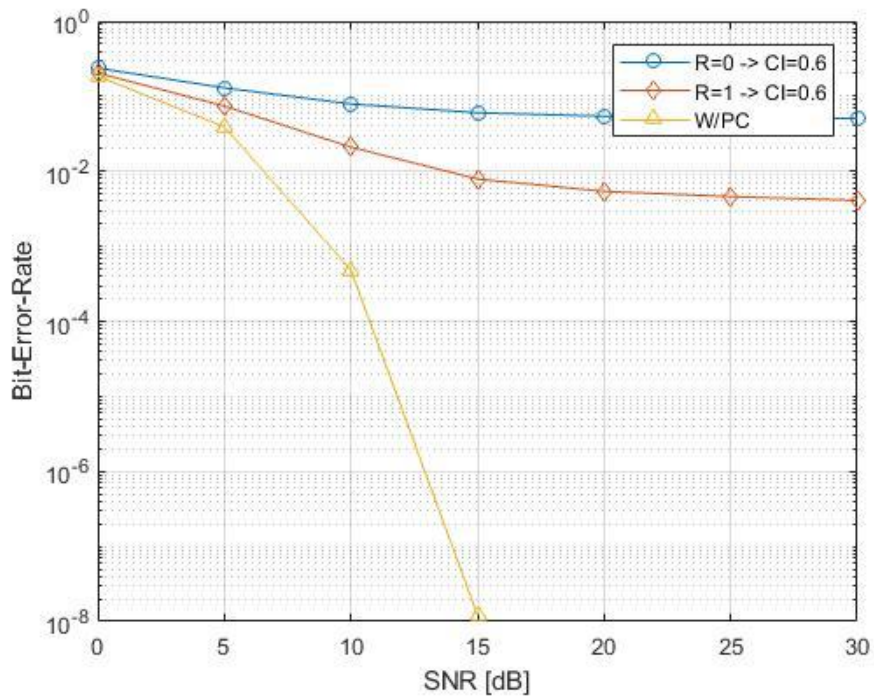


Figura 57: Curvas BER vs. SNR de la Comparativa de Escenarios 0 y 1A para $CI=0.6$

- BER vs. SNR ($CI=0,3$):

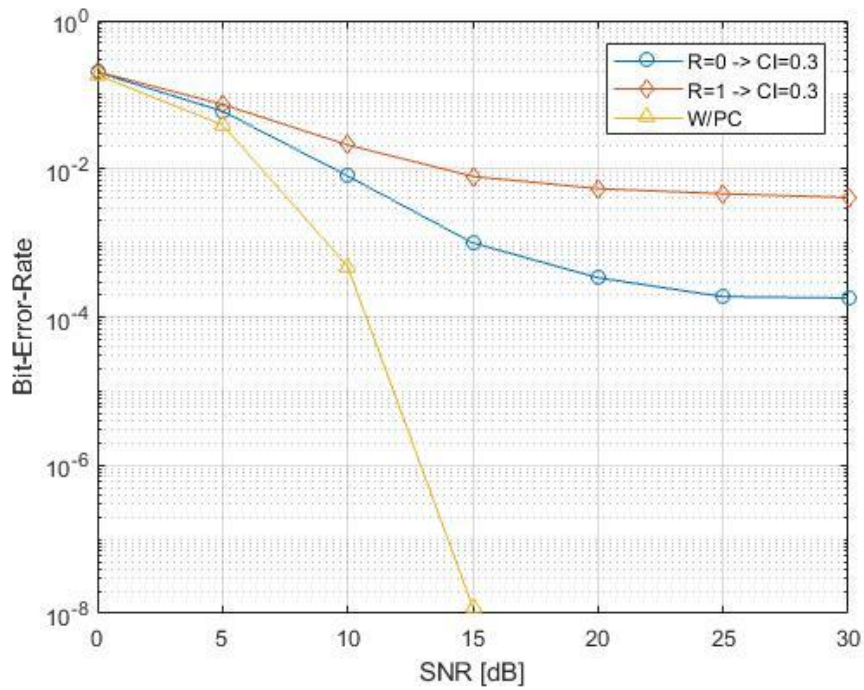


Figura 58: Curvas BER vs. SNR de la Comparativa de Escenarios 0 y 1A para $CI=0,3$

- MSE vs. SNR ($CI=0,6$):

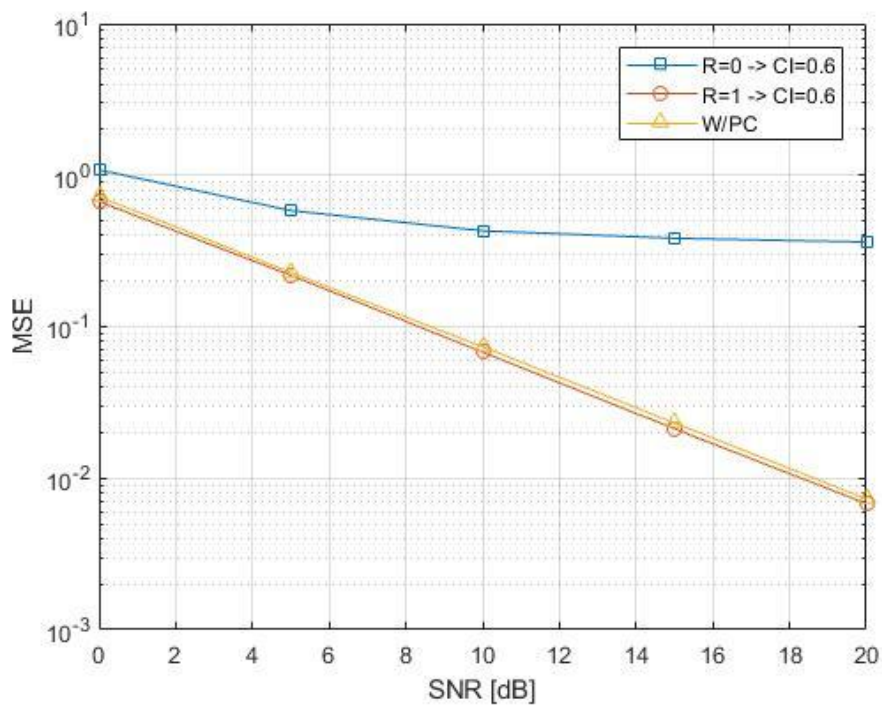


Figura 59: Curvas MSE de la estimación del canal vs. SNR de la Comparativa de Escenarios 0 y 1A para $CI=0,6$

- MSE vs. SNR ($CI=0,3$):

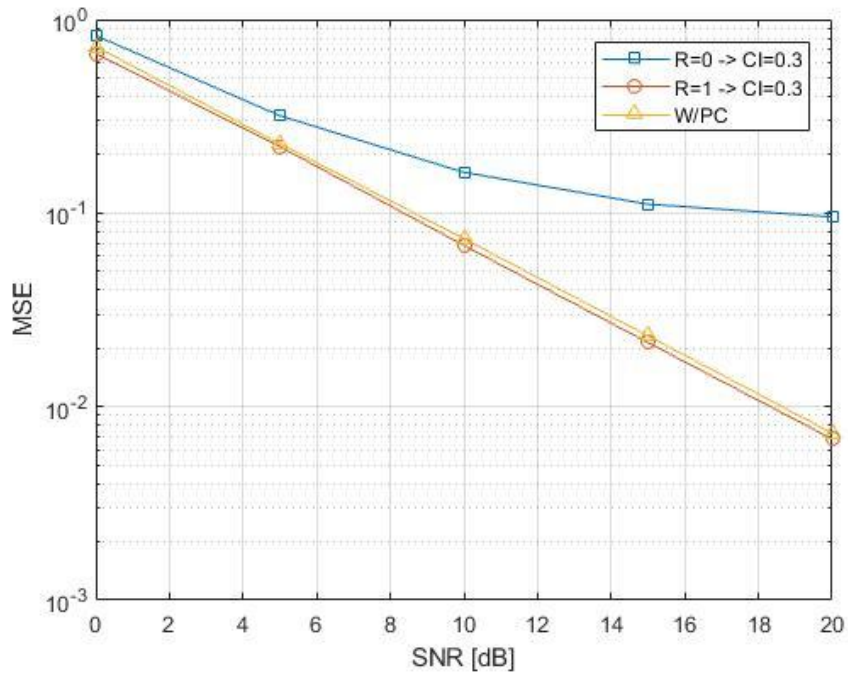


Figura 60: Curvas MSE de la estimación del canal vs. SNR de la Comparativa de Escenarios 0 y 1A para $CI=0.3$

- **Comparativa** para factor $CI=0,6$ y $CI=0,3$ de los escenarios con tres celdas (Escenario 1B y 2):

- BER vs. SNR ($CI=0,6$):

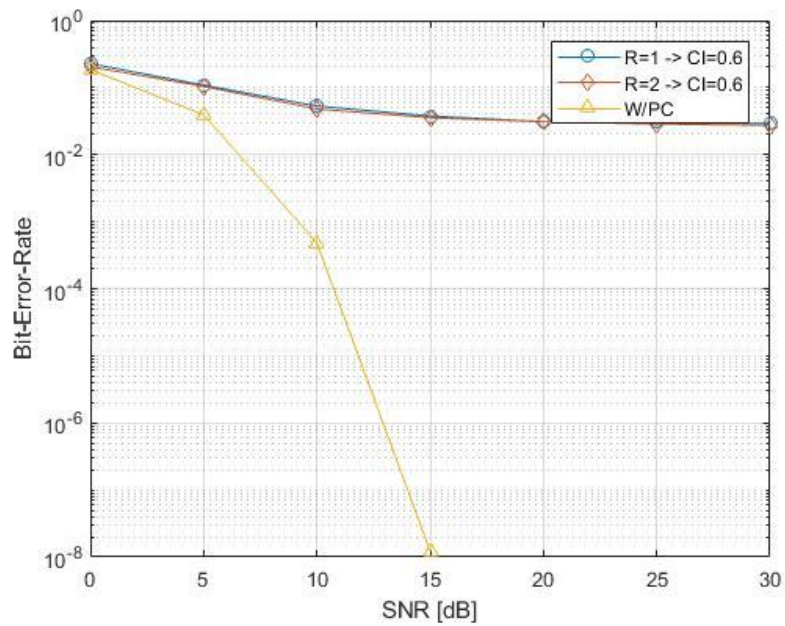


Figura 61: Curvas BER vs. SNR de la Comparativa de Escenarios 1B y 2 para $CI=0.6$

- BER vs. SNR ($CI=0,3$):

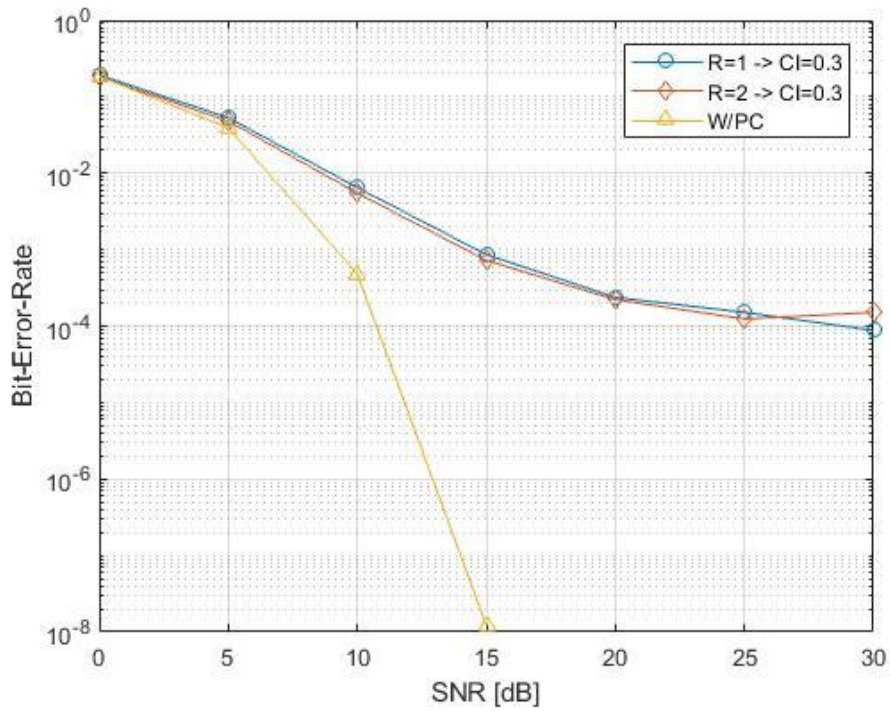


Figura 62: Curvas BER vs. SNR de la Comparativa de Escenarios 1B y 2 para $CI=0.3$

- MSE vs. SNR ($CI=0,6$):

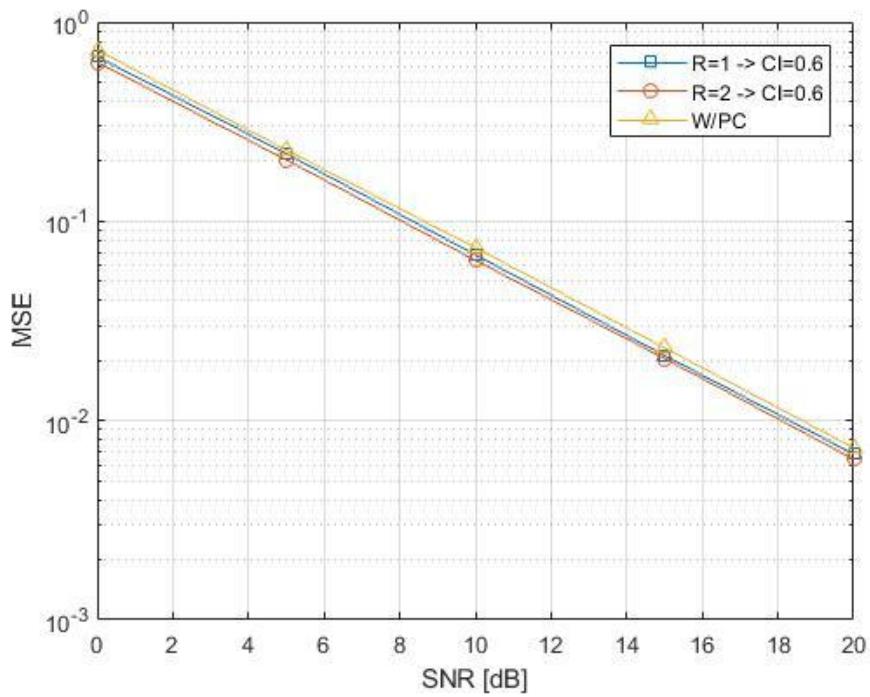


Figura 63: Curvas MSE de la estimación del canal vs. SNR de la Comparativa de Escenarios 1B y 2 para $CI=0.6$

- MSE vs. SNR ($CI=0,3$):

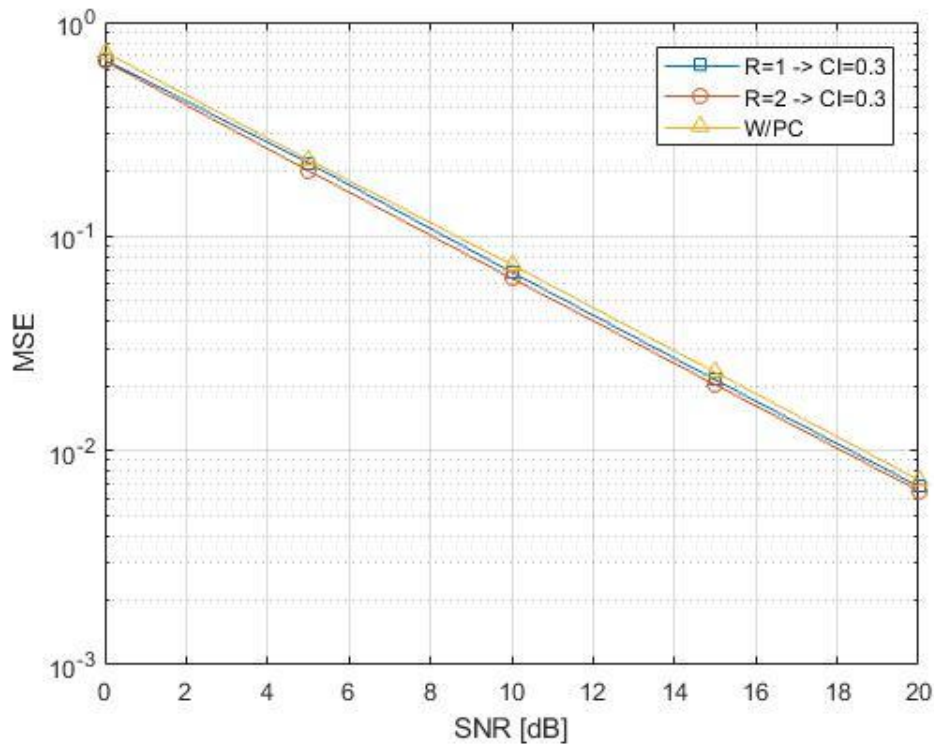


Figura 64: Curvas MSE de la estimación del canal vs. SNR de la Comparativa de Escenarios 1B y 2 para $CI=0,3$

Como resultado de la representación de las gráficas se obtienen unas curvas representativas del sistema, que ilustran el efecto que está provocando la contaminación de pilotos según el factor de Reuso utilizado.

Para el Escenario 0, se puede observar que, al usar una celda contigua interferente con la misma secuencia ortogonal de pilotos, la comunicación se vería seriamente afectada.

En el rango de distancias estudiado con los diferentes factores CI , las curvas para la BER vs. MSE alcanzan un suelo de ruido (*noise floor*) rápidamente, imposibilitando la comunicación por la mala estimación realizada del canal al estar sus pilotos contaminados por otros de la misma secuencia.

De la misma manera ocurre con la estimación del canal al observar las curvas de MSE vs. BER. Comparando con la curva del mejor caso (sin contaminación de pilotos), que es prácticamente lineal, se observa que a medida que se incrementa el factor de CI la estimación del canal empeora notablemente y alcanza el suelo de ruido de forma más rápida.

Para el caso de Reuso-1 en los escenarios 1A y 1B se observa que con respecto al escenario 0, las curvas de BER mejoran, dado al uso de una secuencia ortogonal en la

celda contigua lo que produce que los pilotos no quedaran "contaminados". Así se da lugar a una mejor comunicación y a un sistema más eficiente, aunque aún lejos del caso de no tener contaminación de pilotos ya que se llega a un punto donde la transmisión no puede mejorar por el ruido restante de las celdas interferentes (*noise floor*).

No se obtiene el mejor caso con estos escenarios ya que, aunque se solucione de manera parcial la estimación con el canal, se precisan de secuencias más largas, por lo tanto la señal principal se ve afectada por un ruido mayor. De ahí que la comunicación no sea tan eficiente como en el caso de no tener celdas contiguas interfiriendo (*W/PC*).

Sin embargo, para las curvas de MSE, se observa en este caso que la curva resultante en ambos escenarios 1A y 1B se asemeja a la curva del mejor caso ya que al usar las celdas interferentes con secuencias ortogonales distintas la estimación se produce de manera correcta alcanzando casi esa linealidad en las curvas.

Se ha diferenciado el escenario 1A del 1B para poder comparar los sistemas de dos celdas interferentes, de ahí que el escenario 1B tenga una celda de más.

Para el escenario 2, al añadir otra secuencia ortogonal la eficiencia se ve empeorada ligeramente con respecto al escenario 1A (que sólo tenía una celda interferente), sin embargo para el caso combinado (escenario 1B y 2) se llega a la conclusión de que ambas curvas, para el factor $CI=0,3$ y para el factor $CI=0,6$, coinciden. Esta coincidencia se debe a que al tener el mismo número de celdas interferentes, y ambas con secuencias ortogonales a la celda principal el ruido que se produce es similar para ambos escenarios.

Para la comparativa de los escenarios 0 y 1A se concluye, observando las curvas de BER y MSE, que tras usar un factor de reuso superior a 0 el sistema se vuelve más robusto frente a errores, dando lugar a una disminución considerable de pilotos contaminados. Esto permite que la comunicación sea posible.

La misma diferencia se puede observar en las gráficas de MSE vs. SNR de las comparativas.

Para la comparativa del escenario 0 con el 1A se observa que la estimación del canal para el escenario 0 empeora y se aleja de la curva (casi lineal) de una buena estimación. Lo contrario para el escenario 1A, cuya curva da como resultado una buena estimación.

En la comparativa del escenario 1A y 2 con respecto a la calidad de la estimación, se observa que ambos escenarios realizan una estimación del canal correcta debido al uso de celdas con secuencias ortogonales. Dando lugar a curvas casi lineales que se acercan a la curva del escenario donde no se tiene contaminación de pilotos.

9. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

9.1 Conclusiones

En el comienzo de este trabajo se expusieron varias líneas de investigación en el desarrollo de las tecnologías de quinta generación, llevando la atención del trabajo a las técnicas avanzadas de comunicaciones en entornos de radiofrecuencia.

Previamente al establecimiento de los objetivos del proyecto, se presentó un breve y detallado conjunto de tecnologías y de avances realizados hasta la actualidad en materia de las nuevas técnicas de comunicaciones por radio en el ámbito de los estándares de la quinta generación.

En estos avances se presentaron técnicas tan novedosas como la aplicación de múltiples antenas en los sistemas de comunicaciones para mejorar y procurar de alcanzar los requisitos necesarios para cumplir con los objetivos de las futuras redes. Los requisitos son, entre otros: disminuir la latencia, aumentar la fiabilidad del enlace de comunicaciones y aumentar la velocidad de transmisión.

El trabajo ha abarcado un estudio centrado en la aplicación de la técnica avanzada de comunicación de MIMO Masivo que, a día de hoy, siguen investigando profesionales en empresas del sector y universidades técnicas de todo el mundo para su futura aplicación en las redes de comunicaciones inalámbricas de banda ancha.

En este trabajo se ha mostrado una amplia visión sobre el estado actual de esta tecnología, aún en fase de pruebas, desde una evolución de las comunicaciones móviles con su clasificación de tecnologías a las técnicas modernas y avanzadas de comunicaciones en 5G, donde entra el función MIMO Masivo.

En el capítulo 4, se presentaron numerosos ejemplos de posibles aplicaciones en redes con técnicas de MIMO Masivo ya que sus propiedades técnicas abren un nuevo abanico de aplicaciones totalmente novedosas, donde con las características técnicas de las redes actuales no es posible su implementación dado a la alta latencia, la más baja velocidad de transmisión y la mayor probabilidad de errores por interferencias.

Las características técnicas de MIMO Masivo, como se ha podido visualizar en el estudio realizado en este trabajo, ofrecen soluciones a las limitaciones técnicas y a los problemas establecidos para las aplicaciones que requieren los nuevos dispositivos de la quinta generación.

El aumento de la tasa de transmisión, la disminución de la latencia y, sobre todo, la mayor robustez frente a errores por interferencias hace de la técnica de MIMO Masivo, junto con OFDM, la técnica de transmisión inalámbrica a usar en el futuro más próximo.

Tras el análisis realizado en este trabajo, queda patente el mayor problema para implementar la técnica de MIMO Masivo, la contaminación de pilotos. Se ha podido observar el impacto de la contaminación de señales piloto en redes celulares que, como resultado, la comunicación no sería del todo efectiva dependiendo de los factores de reuso y de las distancias de los dispositivos interferentes de las celdas contiguas.

En este trabajo se ha evaluado el efecto interferente de una estación móvil en varias celdas contiguas. Para comenzar se ha evaluado el sistema 16×64 sin celdas contiguas, por tanto, sin contaminación de pilotos. La gráfica del sistema BER vs. SNR que se obtiene da lugar a un gran rendimiento del sistema, ya que la curva probabilidad de error de bit decae de manera muy rápida para una SNR muy baja. Sería un escenario ideal ya que la robustez del sistema frente a errores y la tasa binaria es muy alta.

Posteriormente se han presentado diferentes escenarios donde se han expuesto los resultados de los mismos en el capítulo anterior.

Tras el análisis de los diferentes escenarios se concluye que, dada la importancia de la inserción de pilotos para estimar el canal, se necesita prestar especial importancia en esta cuestión ya que en las futuras redes celulares de MIMO Masivo el impacto de la contaminación de los pilotos que patente de que imposibilitaría la comunicación.

Se ha podido observar tras el estudio de las simulaciones que para un mayor factor de reuso en redes celulares grandes, mejor es la comunicación y menos impacto tiene el efecto de la contaminación de pilotos. Por el contrario las secuencias ortogonales a usar serían mucho las largas, teniendo una cantidad de datos superior a transmitir, lo que implica un uso de los recursos dedicados mayores. Este exceso en el uso de los recursos supone dedicar menos tasa de transmisión para el envío de los datos como tal, dedicando parte para el envío de las secuencias piloto más largas.

Otro objeto concluyente que se ha podido observar tras el análisis llevado a cabo en este proyecto es el impacto de la contaminación de los pilotos cuando el dispositivo de la celda interferente está situado a ciertas distancias de la celda principal. Cuando más cerca se sitúa el MS interferente a la celda principal (mayor factor CI), más interferencias produce en la comunicación dando lugar a un exceso de ruido, lo que da como consecuencia una comunicación no efectiva. Esto ocurre incluso cuando se tienen factores de reuso superiores a 0 y se elimina la contaminación de los pilotos, debido al exceso de ruido de las celdas interferentes que producen, lo que se puede observar en las gráficas, como suelo de ruido.

También hay que tener en cuenta que el estudio de estos escenarios se ha producido en un entorno donde la sincronización se toma como perfecta por lo que es necesario disponer de técnicas dedicadas para la sincronización en sistemas de comunicaciones que usen MIMO Masivo.

La robustez del sistema de MIMO Masivo junto con OFDM permite el escalado de antenas en recepción y en transmisión de forma que se puede adaptar la comunicación y los dispositivos de forma sencilla y barata.

La demanda de tasas de velocidad altas y sistemas de comunicaciones eficientes quedaría solucionada con la aplicación de la técnica de MIMO Masivo en los sistemas de redes celulares. Para alcanzar este objetivo, es necesario hacer hincapié en el estudio de soluciones de los problemas específicos que tienen como consecuencia el escalamiento masivo de antenas.

9.2 Líneas Futuras

Para ser capaces de satisfacer las demandas técnicas y procurar de lograr los avances tecnológicos que la sociedad demanda es necesario un estudio en profundidad y centrar los esfuerzos en la búsqueda de técnicas, como la estudiada en este trabajo, para finalmente alcanzar la eficiencia que estos sistemas ofrecen de manera teórica.

Es necesario, por parte de las instituciones o empresas, la realización y estudio de mapas de cobertura, donde dependiendo del terreno y los obstáculos se adaptan los sistemas de comunicaciones. Especialmente, se necesitan realizar estos mapas para hacer un estudio más preciso de la situación de un posible MS interferente.

Una de las soluciones que se están estudiando para evitar la alta pérdida de tasa binaria al usar secuencias ortogonales tan largas se denomina *Superimposed Training*. La técnica consiste en "sobreimponer" pilotos a los datos para evitar la pérdida de tasa binaria que supone tener recursos dedicados (estimación de canal por los pilotos), como es el caso de las secuencias piloto que se utilizan para estimación de canal.

Uno de los aspectos clave que tienen que afrontar los sistemas con MIMO Masivo es la movilidad de los dispositivos. Es necesario el estudio de técnicas que permitan una estimación de canal más eficiente, ya que este tipo de dispositivos precisan de una tasa de transmisión más baja y están sujetos a un uso de la energía de forma más eficiente que las estaciones base.

A nivel de hardware, se ha concluido en estudios que la complejidad de implementación es muy baja, aunque aun es necesario el estudio de técnicas de construcción de circuitos y diseño de arquitecturas innovadoras para una disminución de costes de construcción y energía y permitir un despliegue masivo, global y accesible para todo el mundo [77].

Finalmente, cabe mencionar que no había en literatura un análisis tan exhaustivo del efecto de la *Pilot Contamination* en escenarios realistas que simulen una red celular por lo que se deja abierta la puerta a continuar con esta línea de estudio.

10. SUMMARY OF THE PROJECT (IN ENGLISH)

10.1 Introduction and Objectives

In recent years, mobile communications with a large variety of services have been occupying more and more space in the radio-electric spectrum due to the great diversity of devices that transmit in similar radio frequencies (RF) and has arisen, due to new technologies emerging from communications and the need to transmit more information at a much higher transmission rate.

Telephony services with a high amount of data transmission, high-quality television broadcasting services (HDTV broadcasting) or telephony services with a large amount of data transmission (5G) are some of the new needs in today's technology. There are new techniques to take full advantage of the radio-electric spectrum, since this is a limited resource.

In order to maintain a high special efficiency, the modulation technique that combines the best features is Orthogonal Frequency-Division Multiplexing, OFDM. It is the modulation technique used in this project, which is useful for the propagation of the multiple paths (multipath propagation). This technique consists of transmitting modulated information on a high number of subcarriers that are multiplexed at frequency generating what is called the OFDM symbol, formed by the element of the subchannels that are orthogonal to each other. This orthogonality gives rise to the high efficiency spectral efficiency sought in addition to providing gain in frequency diversity and improving the performance of the physical layer.

Another of the techniques that are very attractive to achieve solutions in the speed of information transmission in wireless links and, therefore, obtain maximum efficiency, the combination of OFDM technology with multiple antenna technologies in transmission and reception (MIMO - Multiple input and multiple output) which could lead to the best solution [3].

Systems of multiple antennas offer a greater increase of the capacity of transmission than systems of transmission SISO (Single-Input and Single-Exit). This MIMO-OFDM combination offers a multitude of advantages and solutions in an effective way, the problems previously mentioned allow to improve the performance reducing the effect of interferences, being in this way the transmission technique used jointly in this project.

Among the objectives of this work, one of them is to present both techniques, design a communications system, present the functionality for mobile devices of the fifth generation of mobile communications (5G), introduce its functionality, advantages and offer a solution to the technical problem that it faces.

The data on transmission quality will be analyzed on a channel that simulates an OFDM-MIMO communication environment in which a multitude of parameters can be found, among them, the number of transmissions and receivers.

MIMO is a technique in which several antennas are used in transmission and reception (For example: MIMO 4x4) to improve the quality, capacity, robustness and speed of the link which has been seen significantly improved by the number of antennas in transmission and reception (For example: 16x64). This increase in antennas in MIMO systems is called Massive MIMO (Massive MIMO). It's a revolutionary technology that has many advantages over standard MIMO and increases its efficiency and energetic consumption [4]. Despite the fact that the results offered by the MIMO system arise a series of problems that specifically affect Massive MIMO environments, as mutual coupling or the problem with spatial correlation between antennas [5].

The project analyzed a series of scenarios that simulate an advanced environment of Massive MIMO, a derivative of the OFDM-MIMO system, in which the behavior of its effects is reflected, proposing possible solutions to the problem of pilot contamination. which causes a bad estimation of the channel resulting in poor performance. These scenarios simulate a red base with 64 transmitting/receiving antennas and 16 mobile antennas/mobile devices that transmit information from mobile devices to the base of the station (uplink). The cells (with hexagonal shape) neighboring the main cell generate interference that in this condition can be affected problem of pilot contamination.

10.2 State of the Art

Advances in mobile communications technologies are evolving at an unstoppable pace, with a frenetic development of cutting-edge products in which more and more emerging industries are set, and where current industries place special emphasis and allocate large economic resources to adapt to these given the potential they offer. Facilitate mobility for users, provide better and more varied multimedia services, strengthen efficiency in companies, provide fast and efficient medical and safety services, improve traffic and the environment through IoT devices are some examples of the impacts of applications of fifth generation mobile communication devices (5G).

In order to make these advances tangible, developments arise that encourage research and technological innovation based on the demand for multimedia services with high speed data transmission and high spectral efficiency that currently with the fourth generation (4G) is difficult to achieve. get even higher service transmission rates (100 Mbps) than traditional third generation (3G) systems. It has become crucial to incorporate advances in the physical layer in mobile communications systems, advances that are made and will be tangible in 5G communications devices such as the MIMO technique [6] or more advanced techniques, such as studied in this work, Massive MIMO.

In this section of the work the situation of mobile communications technology it's presented in the Spanish section from its beginnings with 1G and GSM to the state of these technologies at present with a vision to the future in 5G including a study of the investigations recently made with the objective of gathering the most relevant and

transcendental knowledge about the situation of the technology to be developed in this work, the radio communication techniques for 5G with the application of Massive MIMO.



Figura 65: Applications of 5G Communication [33]

10.3 Social and Economical Values

The development of the advanced communication technique of Massive MIMO applied to the fifth generation technologies and devices will be a decisive step to strengthen 5G since, due to its characteristics, it will allow to reach, and overcome, part of the technical requirements that these technologies require.

The fifth generation will lead to a revolution in current mobile communications as it will change the way people communicate with their environment, people and the way they work. Although the network and all its requirements have not yet been fully defined, the "collateral" applications and technologies that will become tangible in the not too distant future give rise to the prediction of a technological revolution that will have a direct effect on society in many aspects of the day by day while generating new business opportunities.

An example of the technology that will lead to the advances of 5G is the Internet of Things (IoT), where multiple devices and base stations will have massive MIMO technology for its correct scalability and efficiency. The impact of the economic potential of the Internet of Things for the year 2025 is estimated, according to the global strategic consultancy McKinsey, between 4 and 11 billion US dollars worldwide considering this technology as a link between the physical world and the digital world [63].

IoT applications focused on business are likely to encompass about 70% of the total economic impact compared to applications dedicated to own consumption, although they are the most attractive to bring innovations in services such as monitoring of health status or autonomous cars. Because this technology has a very dynamic economy, in developing countries it will have an impact of 40% of its value although the global impact will be greater in developed countries where it will be the clients and direct users who will capture most of the Benefits. Given the digitalization of technology, new business models are being created and IoT is beginning to have a great impact on how material goods are created, distributed and used so that for this technology to acquire its full potential it has to be pay special attention to achieve interoperability between devices, scalability and to ensure the security and privacy of user rights [63]. The direct economic impact of the MIMO Massive technique lies mainly in the frequency bands in which it transmits due to the auctioning of frequencies for use in the limited spectrum and the properties of each of the bands. Lately, it has been believed that low frequency bands such as the 1 GHz band were the bands that generated the most value and impact due to their superior propagation and their penetration properties indoors. But this paradigm ceases to be true in the new era where telecommunications companies offer unlimited data plans and where channel capacity ceases to be a problem due to the use of the Massive MIMO technique, whose potential will increase spectral efficiency mainly in high frequencies, generally in the 3.4 to 3.8 GHz bands.

5G will improve user experience in all aspects of communication, transport, sociability and productivity, allowing the development of devices, sensors and products of all types with internet connectivity. It is estimated that fifth generation 5G technology will create 22 million jobs and produce up to 12.3 billion services and products by the year 2035 having a positive impact on many applications such as education, transportation, security and entertainment [65]

10.4 Principles of OFDM

OFDM (Orthogonal Frequency Multiplexing Division) is a transmission technique in which the data is transmitted in parallel to a certain number of sub-channels or, in other words, the different sub-channels carry different parts of the modulated data . It is a good technique to apply because it combats temporal dispersion very efficiently when transmitting data on a multitude of carriers (subcarriers) that have a small bit rate.

Temporal dispersion occurs unavoidably due to the effects produced by the channel on the signal to be transmitted, among them: the losses produced by propagation (directly proportional to the square of the distance), frequency selectivity of the channel, multipath propagation (multipath propagation) causing intersymbol interference (ISI). All these negative effects have to be combated in the design of a robust system, that is why we use the OFDM technique since by extending the length of the symbol using a multi-carrier modulation with a cyclic prefix (CP) we can eliminate in the receiver all ISI through the application of a guard interval, while minimizing temporal dispersion.

Currently, OFDM is the modulation technique used for a multitude of broadband transmission systems such as Digital Terrestrial Television (DVB-T), DAB and also as standards WiFi and WiMAX.

The modulation technique used will be based on multi-carriers, so they are used according to the concept of dividing the transmitted data sequence in a parallel and independent way in the subchannels by transmitting the symbols simultaneously. The OFDM technique tries to partition the available bandwidth (BW) in the N subcarriers, after previously obtaining a symbol sequence precoded by constellations (M-QAM or M-PSK), getting each symbol to modulate each one of these subcarriers. The spacing between them must be taken into account, which must be $\Delta f \geq BW/N$ and later, multiplexing these subcarriers in frequency will generate the spectrum of an OFDM symbol (composed of N data symbols).

One of the objectives to be fulfilled is the high spectral efficiency, and this is achieved since the frequency response of the subchannels overlap each other orthogonally.

10.5 Principles of MIMO

Motivated above all by the need for an increase in transmission speed, reliability, robustness and the improvement of the spectral efficiency of communications, appear different configurations of physical interfaces in order to achieve these objectives.

There are different configurations: MISO (Multiple-Input Single-Output), SIMO (Single-Input Multiple-Output) and, finally, MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) techniques.

The main characteristic of systems with multiple antennas in transmission and reception is that the increase in channel capacity, measured in Bits / s / Hz, is proportional to the increase in the number of antennas in input and output.

Depending on the objectives of the application of the multi-antenna technique wanted to achieve, it can implemented MIMO systems in several ways in which it's highlighted two different techniques:

1. Spatial Diversity.
2. Spatial Multiplexing.

If the interest of implementation lies in improving the reliability of the link, we would use the MIMO implementation of spatial diversity, which consists of sending the same data through different propagation paths, so that if any portion of the data is lost by effects of the channel or interference, the probability that it reaches the receiver by being sent by another different transmitting antenna increases considerably, and therefore, its performance improves significantly. The most widely used diversity technique is that of Alamouti, where diversity gain is improved.

If, on the contrary, the objective is not so focused on diversity but on improving the data transmission speed of the system, the technique to be implemented will be the transmission through spatial multiplexing, which is responsible for sending different portions of the data to be sent in each of the propagation paths, in order to cause a great increase in the transmission of data.

Massive MIMO, basically consists of the use of a greater number of antennas in transmission and in reception to improve the performance of data transmission and its transmission rate due to as many possible paths in which the data is propagated. But the application of this technique supposes a greater complexity of the used hardware and of the processing of the signal in both ends where, in addition, the power consumption shoots up.

It is common to question when a MIMO system is considered Massive MIMO and, although there is no fixed specification and this is an extension of MIMO, it is considered a system as Massive MIMO when the antenna array becomes tens and hundreds. in the transmitter and receiver, for example: MIMO 16x16. According to the FP7-MAMMOET project of the European Union, Massive MIMO began being viewed for the Time Division Duplex (TDD), but it has been verified that it would also work for the Frequency Division Duplex (FDD), which leads to a much wider spectrum of use. Another of the great benefits that the use of Massive MIMO with the "traditional" MIMO would provide are the use of cheap electronic components, access to a highly reduced latency, a simplification of the Medium Access Control (MAC) layer and a improvement in robustness against interference [77].

10.6 Pilot Contamination

Part of the disadvantages to take into account and to improve the application of this practice of Massive MIMO are the following:

- Reduction of energy consumption since it can be increased by using more antennas.
- Achieve a synchronization and an effective handover for new devices.
- Location of new deployment scenarios for the new antenna systems.
- Fight the Pollution of Pilots to estimate the channel.

In this work, the study has been focused in the Pilot Pollution problem, whose characteristic is linked to the use of Massive MIMO systems and it is a patent phenomenon in the scenarios under the action of interference.

There is a base station in the center of a virtual cell where a terminal wishes to establish a connection with it, so in an ideal environment pilot signals would be sent in uplink (from the mobile terminal to the base station) to estimate the channel in a way correct, in MIMO Massive a sequence of pilot signals organized orthogonally is used so that when received at the base station could be obtained without problem. The problem lies in the moment that terminals are started in adjacent cells that in turn transmit the carrier

signals with the same orthogonal sequence as the mobile terminal that was in the main cell, thus causing serious interference and contaminating the pilots sent and not allowing the correct estimation of the channel by the receiver, thus making an erroneous detection when the base station cannot divide the two signals.

To conclude with the pilots contamination principles section, it is worth noticing that this effect is especially harmful in MIMO scenarios with M antennas, where M is a high number, since the array gain is an increase proportional to M the superposition of the signals received in interfering and desired power.

10.7 Development of a MIMO-OFDM System

In this chapter it's described an OFDM system with Massive MIMO implemented in MATLAB® with a total of 16 antennas in transmission and 64 antennas in reception, from the creation of a sequence of information bits to send, simulating a transmission with the MIMO technique and receiving that sequence of bits in a receiver after its correct demodulation.

It has been decided to use MATLAB® for the implementation due to its high capacity of modeling with matrices and vectors, that for the design of an OFDM-MIMO transmission system the use of matrix systems is necessary. To begin with the description of the system it is worth mentioning that the program has been divided into several modules for its simplicity of understanding. The created modules are mentioned below:

1. Main program: the execution of the program is performed where, in it, the various calls to other functions are produced. In this program, the main parameters of the execution are established, such as: SNR, bandwidth (BW), number of subcarriers, number of pilot subcarriers, number of transmitter / receiver antennas, preamble length ... etc.

In this main module, a behavior has been programmed so that a package is created and transmitted through a multi-antenna system in a channel that simulates the real channels. First, all the parameters are established, the channels are generated and the variables are initialized. Once the variables are initialized, the call is made to the different modules for transmission.

2. Auxiliary function modules: In these modules, different function files have been generated that are used from the main program file. These functions act as each of the boxes in the block diagram individually.

We have the following:

- Modeling of the channel: It is a function module that is responsible for generating channels with independent Rayleigh fading (fading channels) by returning their corresponding paths where numerous factors / parameters are taken into account, such

as the number of Doppler filter taps and the parameters of SUI-3 channel model, which will be the applied model.

- Modulator Function: This is a function that acts as the coherent modulator, returning the signal to be transmitted.

- Channel AWGN: It is the function where the channel with white and Gaussian additive noise is generated and simulated by where the sent bits pass and are affected by the effects of the same.

- Demodulator function: It is a function that acts as the coherent demodulator, returning the received bits after a process of channel estimation, equalization and finally demodulation.

- Estimation of BER and MSE: In these modules the estimation of the MSE (Medium Square Error) and the BER (Bit Error Rate) is produced.

10.8 Simulation and Results

As a result of the representation of the graphs, representative curves of the system are obtained, which illustrate the effect that pilot contamination is causing according to the reuse factor used.

For Scenario 0, it can be seen that, by using an interfering contiguous cell with the same orthogonal sequence of pilots, the communication would be seriously affected. In the range of distances studied with the different *CI* factors, the curves for the BER vs. MSE reach a noise floor quickly, making communication barely possible due to the bad estimation made of the channel since its pilots are contaminated by others of the same sequence.

In the same way it happens with the estimation of the channel when observing the curves of MSE vs. BER. Comparing with the curve of the best case (without contamination of pilots), which is practically linear, it is observed that as the *IC* factor increases, the channel estimate deteriorates significantly and reaches the noise floor more quickly.

10.9 Conclusion and Future Views

At the beginning of this work several lines of research were exposed in the development of fifth generation technologies, bringing work attention to advanced communication techniques in radiofrequency environments.

Prior to the establishment of the project objectives, a brief and detailed set of technologies and advances made to date in the field of new radio communication techniques in the field of fifth generation standards was presented.

In these advances, such new techniques as the application of multiple antennas in communication systems were presented to improve and try to achieve the necessary

requirements to meet the objectives of future networks that are, among others: to reduce latency, increase reliability of the communication link and increase the transmission speed.

The work has covered a study focused on the application of the advanced communication technique of Massive MIMO.

This work has shown a broad view on the current state of this technology, still in the testing phase, from an evolution of mobile communications with its classification of technologies to modern techniques and advanced communications in 5G where the MIMO function enters in a massive way.

The technical characteristics of MIMO Massive, as it has been possible to visualize in the study carried out in this work, offer solutions to the technical limitations and to the problems established for the applications that require the new devices of the fifth generation.

The increase in the transmission rate, the decrease in latency and, above all, the greater robustness against interference errors makes the MIMO Massive technique, together with OFDM, the wireless transmission technique to be used in the nearest future.

After the analysis carried out in this work, the biggest problem to implement the Massive MIMO technique is pilot contamination. It has been possible to observe the impact of the contamination of pilot signals in cellular networks that, as a result, the communication would not be entirely effective depending on the reuse factors and the distances of the interfering devices of the adjacent cells.

In this work the interference effect of a mobile station in several contiguous cells has been evaluated. To begin with, the 16×64 system has been evaluated without contiguous cells, therefore, without pilot contamination. The graph of the BER vs. The SNR obtained results in a high performance of the system since the bit error probability curve decays very quickly for a very low SNR. It would be an ideal scenario since the robustness of the system against errors and the bit rate is very high.

After the analysis of the different scenarios, it is concluded that, given the importance of the insertion of pilots to estimate the channel, it is necessary to pay special attention in this matter since in the future cellular networks of MIMO Massive the impact of the contaminated pilots would make communications impossible.

It has been observed after the study of the simulations that for a greater reuse factor in large cellular networks, communication is better and less impact has the effect of pilot contamination. On the contrary, the orthogonal sequences to be used would be much longer, having a greater amount of data to transmit, which implies a use of the greater dedicated resources. This excess in the use of resources supposes to dedicate less

transmission rate for the sending of the data as such, dedicating part for the sending of the longest pilot sequences.

Another conclusive object that has been observed after the analysis carried out in this project is the impact of the contamination of the pilots when the device of the interfering cell is located at certain distances from the main cell. The closer the interfering MS is to the main cell (higher *CI* factor), the more interference it produces in the communication, resulting in an excess of noise, which results in ineffective communication.

It is also important to keep in mind that the study of these scenarios has taken place in an environment where the synchronization is taken as perfect so it is necessary to have dedicated techniques for synchronization in communication systems that use Massive MIMO.

The demand for high speed rates and efficient communication systems would be solved with the application of the Massive MIMO technique in cellular network systems. To achieve this goal, it is necessary to emphasize the study of solutions to the specific problems that result in the massive scaling of antennas.

To be able to satisfy the technical demands and seek to achieve the technological advances that society demands, it is necessary to study in depth and focus efforts on the search of techniques, such as the one studied in this paper, to finally achieve the efficiency that These systems offer theoretically.

It is necessary, on the part of institutions or companies, the realization and study of coverage maps, where depending on the terrain and obstacles, communication systems are adapted. Especially, these maps need to be made to make a more accurate study of the situation of a possible interfering MS.

One of the solutions that are being studied to avoid the high loss of bit rate when using such long orthogonal sequences is called Superimposed Training. The technique consists of "overlaying" pilots to the data to avoid the loss of the binary rate that implies having dedicated resources (channel estimation by the pilots), as is the case of the pilot sequences that are used to estimate the channel.

Finally, it should be mentioned that there was no such exhaustive analysis in literature of the effect of Pilot Contamination in realistic scenarios simulating a cellular network, leaving the door open to continue with this line of study.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] I. Yaqoob, I. A. T. Hashem, Y. Mehmood, A. Gani, S. Mokhtar and S. Guizani, "Enabling Communication Technologies for Smart Cities," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 1, pp. 112-120, January 2017.
- [2] B. Sklar, "Rayleigh fading channels in mobile digital communication systems. I. Characterization," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 35, no. 9, pp. 136-146, Sep 1997.
- [3] H. Bolcskei, "MIMO-OFDM wireless systems: basics, perspectives, and challenges," in *IEEE Wireless Communications*, vol. 13, no. 4, pp. 31-37, Aug. 2006.
- [4] F. Rusek, D. Persson, B. K. Lau, E. G. Larsson, T. L. Marzetta, O. Edfors, and F. Tufvesson, "Scaling up MIMO: Opportunities and challenges with very large arrays," *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 30, no.1, pp. 40–46, Jan. 2013.
- [5] N. H. M. Adnan, I. M. Rafiqul and A. H. M. Z. Alam, "Massive MIMO for Fifth Generation (5G): Opportunities and Challenges," *2016 International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCE)*, Kuala Lumpur, 2016, pp. 47-52.
- [6] V. Bhargava, "State of the art and future trends in wireless communications: Advances in the physical layer," in *Proc. Annu. Commun. Netw.Serv. Res. Conf.*, Moncton, NB, Canada, May 2006, pp. 1–3.
- [7] Schwartz, M. (2004). *Mobile wireless communications*. Cambridge University Press.
- [8] Pahlavan, K., & Krishnamurthy, P. (2011). *Principles of wireless networks: A unified approach*. Prentice Hall PTR.
- [9] Pachauri, A. K., & Singh, O. (2012). 5G Technology–Redefining wireless Communication in upcoming years. *International Journal of Computer Science and Management Research*, 1(1), 12-19.
- [10] B. A. Kumar and P. T. Rao, "Overview of advances in communication technologies," *2015 13th International Conference on Electromagnetic Interference and Compatibility (INCEMIC)*, Visakhapatnam, 2015, pp. 102-106.
- [11] Rao, T. V. N. (2011). 5G Technologies–An Anecdote of Network Service for the Future. *International Journal of Global Research in Computer Science (UGC Approved Journal)*, 2(7), 164-170.
- [12] Jochen, S. (2003). *Mobile Communications*. Addison-Wesley.
- [13] Rappaport, T. S. (1996). *Wireless communications: principles and practice* (Vol. 2). New Jersey: prentice hall PTR.

- [14] Blasco, L., "Cuáles son las diferencias entre E, GPRS, 3G, 4G, 5G y esas otras redes a las que se conecta tu celular (y cómo te afectan tu conexión a internet)", *BBC Mundo*, 05-09-2016. [En línea]. Disponible en: <http://www.bbc.com/mundo/noticias-37247130>
- [15] Stallings, W. (2007). *Data and computer communications*. Pearson Education India.
- [16] Rohde&Schwarz, "Principios básicos de GSM / GPRS / EDGE Evolution / VAMOS", *Rohde&Schwarz*. 2017. [En línea]. Disponible en: https://www.rohde-schwarz.com/es/soluciones/comunicaciones-inalambricas/gsm-gprs-edge-evolution-vamos/fundamentos/principios-basicos-de-gsm_106328.html
- [17] Sesia, S., Baker, M., & Toufik, I. (2011). *LTE-the UMTS long term evolution: from theory to practice*. John Wiley & Sons.
- [18] Zavia, M.S., "¿Qué es LTE?", *Xataka*, 22-02-2012. [En línea]. Disponible en: <https://www.xataka.com/moviles/que-es-lte>
- [19] S. Ajey, B. Srivalli and G. V. Rangaraj, "On performance of MIMO-OFDM based LTE systems," *2010 International Conference on Wireless Communication and Sensor Computing (ICWCSC)*, Chennai, 2010, pp. 1-5.
- [20] Bourque, B., "What's the difference between 4G and LTE?", *Digital Trends*, 04-05-2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.digitaltrends.com/mobile/4g-vs-lte/>
- [21] Álvarez, E., "España, entre los países con mejor conexión 4G del mundo", *Computer Hoy*, 21-02-2018. [En línea]. Disponible en: <https://computerhoy.com/noticias/internet/espana-paises-mejor-conexion-4g-del-mundo-76257>
- [22] M. Lauridsen, L. C. Gimenez, I. Rodriguez, T. B. Sorensen and P. Mogensen, "From LTE to 5G for Connected Mobility," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 3, pp. 156-162, March 2017.
- [23] Cisco, "Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2016–2021," White Paper, 2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/mobile-white-paper-c11-520862.html>
- [24] Cid, M., "5G: sigue la pelea por imponerse en un estándar que no se fijará hasta 2018", *Xataka*, 13-6-2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.xataka.com/moviles/5g-sigue-la-pelea-por-imponerse-en-un-estandar-que-no-se-fijara-hasta-2018>
- [25] 3GPP, "Releases", *3GPP The Mobile Broadband Standard*, Releases, 2017.

- [26] Samsung Networks News, "Samsung Electronics Sets 5G Speed Record at 7.5Gbps, Over 30 Times Faster Than 4G LTE", *Samsung Electronics Co., Ltd*, 15-10-2014. [En línea]. Disponible en: <https://www.samsung.com/global/business/networks/insights/news/samsung-electronics-sets-5g-speed-record-at-7-5gbps-over-30-times-faster-than-4g-lte/>
- [27] Cid,M., "Cuatro aplicaciones sorprendentes que demuestran que el 5G va más allá de tu Smartphone", *Xataka*, 09-11-2015. [En línea]. Disponible en: <https://www.xataka.com/moviles/cuatro-aplicaciones-sorprendentes-que-demuestran-que-el-5g-va-mas-alla-de-tu-smartphone>
- [28] Muñoz, R., "Vodafone y Huawei completan en España la primera llamada de móvil 5G del mundo", *El País*, 20-02-2018. [En línea]. Disponible en: https://elpais.com/economia/2018/02/20/actualidad/1519124330_820236.html
- [29] M. F. Domingues et al., "Insole optical fiber Bragg grating sensors network for dynamic vertical force monitoring," *J. Biomed. Opt.*, vol. 22, no. 9, pp. 091507–091507, 2017.
- [30] F. Al-Turjman, M. Karakoc, M. Gunay, and A. Noureldin, "Routing mobile data couriers in smart-cities," in 2016 IEEE International Conference on Communications (ICC), 2016, pp. 1–6.
- [31] U. D. Ulsar, G. Celik and F. Al-Turjman, "Wireless Communication Aspects in the Internet of Things: An Overview," *2017 IEEE 42nd Conference on Local Computer Networks Workshops (LCN Workshops)*, Singapore, 2017, pp. 165-169.
- [32] C. Phillips, D. Sicker, and D. Grunwald, "A Survey of Wireless Path Loss Prediction and Coverage Mapping Methods," *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, vol. 15, no.1, pp. 255–270, First 2013.
- [33] M. Agiwal, A. Roy and N. Saxena, "Next Generation 5G Wireless Networks: A Comprehensive Survey," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 18, no. 3, pp. 1617-1655, thirdquarter 2016.
- [34] IEEE, ComSoc, "Best Readings Topics on Massive MIMO", *IEEE ComSoc*, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.comsoc.org/best-readings/topics/massive-mimo>
- [35] E. G. Larsson, F. Tufvesson, O. Edfors, and T. L. Marzetta, "Massive MIMO for Next Generation Wireless Systems," *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 2, pp. 186-195, February 2014.
- [36] L. Lu, G. Y. Li, A. L. Swindlehurst, A. Ashikhmin, and R. Zhang, "An Overview of Massive MIMO: Benefits and Challenges," *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, Vol. 8, No. 5, pp. 742-758, October 2014.

- [37] E. Björnson, E. G. Larsson and T. Marzetta, "Massive MIMO: Ten Myths and One Critical Question", *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, no. 2, pp. 114-123, February 2016.
- [38] T. Marzetta, "Massive MIMO: An Introduction," *Bell Labs Technical Journal*, vol. 20, pp. 11-22, March 2015.
- [39] K. Zheng, L. Zhao, J. Mei, B. Shao, W. Xiang, and L. Hanzo, "Survey of Large-Scale MIMO Systems," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 17, no. 3, pp. 1738-1760, third quarter 2015.
- [40] "Special Issue on 5G Wireless Systems with Massive MIMO," *IEEE Systems Journal*, vol. 11, no. 1, March 2017.
- [41] "Recent Advances in Massive MIMO Systems," *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2016.
- [42] "Special Issue on Large-Scale Multiple Antenna Wireless Systems," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 31, no. 2, February 2013.
- [43] "Special Issue on Signal Processing for Large-Scale MIMO," *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 8, No. 5, October 2014.
- [44] "Special Issue on Massive MIMO," *Journal of Communications and Networks (JCN)*, vol. 15, no. 4, August 2013.
- [45] F. Boccardi, R. W. Heath, Jr., A. Lozano, T. L. Marzetta, and P. Popovski, "Five Disruptive Technology Directions for 5G," *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 2, pp. 74-80, Feb. 2014.
- [46] H. Ji, Y. Kim, J. Lee, E. Onggosanusi, Y. Nam, J. Zhang, B. Lee and B. Shim, "Overview of Full-Dimension MIMO in LTE-Advanced Pro," *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 2, pp. 176-184, February 2017.
- [47] H. Huh, G. Caire, H. C. Papadopoulos, and S. A. Ramprasad, "Achieving 'Massive MIMO' Spectral Efficiency with a Not-So-Large Number of Antennas," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 11, no. 9, pp. 3226-3239, September 2012.
- [48] H. Q. Ngo, E. G. Larsson, and T. L. Marzetta, "Energy and Spectral Efficiency of Very Large Multiuser MIMO Systems," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 61, no. 4, pp. 1436-1449, April 2013.
- [49] H. Yin, D. Gesbert, M. Filippou, and Y. Liu, "A Coordinated Approach to Channel Estimation in Large-Scale Multiple-Antenna Systems," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 31, no. 2, pp. 264-273, February 2013.

- [50] J. Hoydis, C. Hoek, T. Wild, and S. ten Brink, "Channel Measurements for Large Antenna Arrays," in *Proc. IEEE International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)*, Paris, France, August 2012.
- [51] Editorial, "Una normativa que respalde el futuro", *CincoDías - El País*, 16-02-2017. [En línea]. Disponible en: https://cincodias.elpais.com/cincodias/2017/02/16/empresas/1487272666_563394.html
- [52] M. Luciano, "Will 5G Affect Your Health? Maybe...But Probably Not". *Wireless Design Mag*, 02-08-2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.wirelessdesignmag.com/blog/2018/02/will-5g-affect-your-health-mayebut-probably-not>
- [53] Ericsson, "Radio Waves and Health:5G" Sustainability and Corporate Responsibility, 2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.ericsson.com/assets/local/about-ericsson/sustainability-and-corporate-responsibility/documents/radio-waves-and-health/ericsson-radio-waves-and-health-5g.pdf>
- [54] Huawei, "5G Security: Forward Thinking Huawei White Paper" White Paper, 2015. [En línea]. Disponible en: http://www.huawei.com/minisite/5g/img/5G_Security_Whitepaper_en.pdf
- [55] Cid,M., "España ya tiene Plan Nacional 5G: las primeras subastas de espectro llegarán a principios de 2018", *Xataka*, 01-12-2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.xatakamovil.com/conectividad/espana-ya-tiene-plan-nacional-5g-las-primeras-subastas-de-espectro-llegaran-a-principios-de-2018>
- [56] Comunicado de prensa, Ala-Honkola, P., "La UE coordina el espectro clave para impulsar la conectividad en la carrera hacia la 5G", *Consejo de la Unión Europea*, 25-04-2017. [En línea]. Disponible en: <http://www.consilium.europa.eu/es/press/press-releases/2017/04/25/mobile-connectivity-5g-technology/>
- [57] Espuelas, D., "Es Espectro Radioeléctrico", *El Rincón de la Tecnología*, 14-10-2013. [En línea]. Disponible en: <http://tecnologia-escolapioslogrono.blogspot.com.es/2010/12/el-espectro-radioelectrico.html>
- [58] Sociedad de la Información y Agenda Digital, Gobierno de España, "Espectro Radioeléctrico", 2017. [En línea]. Disponible en: <http://www.minetad.gob.es/telecomunicaciones/espectro/informacion/usos-espectro/Paginas/usos-espectro.aspx>
- [59] Sociedad de la Información y Agenda Digital, Gobierno de España, "Espectro Radioeléctrico: Privativo", 2017. [En línea]. Disponible en: <http://www.minetad.gob.es/telecomunicaciones/espectro/informacion/usos-espectro/Paginas/uso-privativo.aspx>

- [60] Sociedad de la Información y Agenda Digital, Gobierno de España, "Espectro Radioeléctrico: Común", 2017. [En línea]. Disponible en: <http://www.minetad.gob.es/telecomunicaciones/espectro/informacion/usuarios-espectro/Paginas/uso-comun.aspx>
- [61] Sociedad de la Información y Agenda Digital, Gobierno de España, "Espectro Radioeléctrico: Especial", 2017. [En línea]. Disponible en: <http://www.minetad.gob.es/telecomunicaciones/espectro/informacion/usuarios-espectro/Paginas/uso-especial.aspx>
- [62] L. Jalloul, A. Mobasher, S. Alex, "Full Duplex System in Massive MIMO", US 20150092621, 2 de abril, 2015.
- [63] Manyika, J., Chui, M., Bisson, P., Woetzel, J., Dobbs, R., Bughin, J., Aharon, D., "Unlocking the the potential of the Internet of Things", *Mckinsey Global Institute*, 01-06-2015. [En línea]. Disponible en: <https://www.mckinsey.com/business-functions/digital-mckinsey/our-insights/the-internet-of-things-the-value-of-digitizing-the-physical-world>
- [64] Rewheel Public Research Note, "The Massive MIMO effect: has the 3.4-3.8 GHz TDD spectrum become more valuable than 800 MHz (and 700 MHz) FDD?", *Rewheel Research*, 12-04-2018. [En línea]. Disponible en: http://research.rewheel.fi/downloads/3.4GHz_massive_MIMO_spectrum_auction_paradigm_change_12042018.pdf
- [65] SIAG Consulting, "5G ¿Cuál será su impacto económico y social?", *SIAG Consulting*, 29-09-2017. [En línea]. Disponible en: <http://siagconsulting.es/5g-sera-impacto-tecnologico-social/>
- [66] I. Chih-Lin, C. Rowell, S. Han, Z. Xu, G. Li, and Z. Pan, "Toward green and soft: A 5G perspective," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 2, pp. 66–73, Feb. 2014.
- [67] Europa Press, "El 5G será 10 veces más eficiente energéticamente que el 4G en cinco años, según Ericsson", *La Vanguardia*, 01-03-2017. [En línea]. Disponible en: <http://www.lavanguardia.com/vida/20170301/42431913253/el-5g-sera-10-veces-mas-eficiente-energeticamente-que-el-4g-encinco-anos-segun-ericsson.html>
- [68] Dusan Matic, "Mathematical Description of OFDM", *JPL's Wireless Communications*. [En línea]. Disponible en: <http://www.wirelesscommunication.nl/reference/chaptr05/ofdm/ofdmmath.htm>
- [69] D. Pérez Vaquero, "Implementación de sistema MIMO mediante modulación OFDM", Proyecto Fin de Carrera, Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones, Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, España, 2014. [En línea]. Disponible en: <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/22257>

[70] Keysight Technologies, Inc., "Concepts of Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) and 802.11 WLAN". [En línea]. Disponible en: http://rfmw.em.keysight.com/wireless/helpfiles/89600b/webhelp/subsystems/wlan-ofdm/content/ofdm_basicprinciplesoverview.htm

[71] Charles U. Ndujiuba, Augustus E. Ibhaze, Dynamic Differential Modulation of Sub-Carriers in OFDM, *Journal of Wireless Networking and Communications*, Vol. 6 No. 1, 2016, pp. 21-28. doi: 10.5923/j.jwnc.20160601.03.

[72] V. Vargas, C., E. Lopez, W., & F. da Rocha, C. (2007). Sistemas de Comunicación Inalámbrica MIMO-OFDM. *Acta Nova*, 3, 750-760.

[73] Research Gate, "Channel capacity of SISO and MIMO", *Research Gate*, Julio 2017. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/figure/Channel-capacity-of-SISO-MIMO-2X2-MIMO-3X3-and-MIMO-4X4-IV-CONCLUSIONS_fig1_320394757

[74] Research Gate, "An overview of ultra-wide-band systems with MIMO", *Research Gate*, Marzo 2009. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/figure/BER-performance-of-MIMO-VHDR-MB-OFDM-Coding-rate-14-1-2-16-QAM-a-Zero-forcing_fig19_224392269

[75] Mathuranathan, "MIMO - Diversity and Spatial Multiplexing", *Gaussian Waves*, 06-08-2014, [En línea]. Disponible en: <https://www.gaussianwaves.com/2014/08/mimo-diversity-and-spatial-multiplexing/>

[76] Elsayed, M., "Spatial Multiplexing in 4G Wireless Communications", *Wireless Communication Systems*, 2017, [En línea]. Disponible en: <http://wireless-communications-systems.blogspot.com/2013/04/spatial-multiplexing-in-4g-wireless.html>

[77] Technikon Forschungsgesellschaft mbH, "Massive MIMO Info Point", *Massive MIMO*, 2018, [En línea]. Disponible en: <https://massivemimo.eu/>

[78] Mundy, J., "What is Masive MIMO Technology?", *5G.co.uk*, 2018, [En línea]. Disponible en: <https://5g.co.uk/guides/what-is-massive-mimo-technology/>

[79] Björnson, E., "Pilot Contamination in a Nutshell", *Massive MIMO Technical Insights*, 14-01-2017, [En línea]. Disponible en: <https://massivemimo.ellintech.se/2017/01/14/pilot-contamination-in-a-nutshell/>

[80] Haider, D., "802.11n and Spatial Multiplexing", *WiFi Jedi.com*, 01-02-2009, [En línea]. Disponible en: <https://wifijedi.com/2009/02/01/how-stuff-works-spatial-multiplexing/>

[81] Goel, A., "Draw the modulated signal for 4-PSK modulation for the following message signal mentioning both the phase & phase shift. 1100011000?", *Quora.com*,

02-07-2014, [En línea]. Disponible en: <https://www.quora.com/Draw-the-modulated-signal-for-4-PSK-modulation-for-the-following-message-signal-mentioning-both-the-phase-phase-shift-1100011000>

[82] Mavares T., Dimas Torres, Rafael P., "Estimador de Canal Diferencial Sobre-Completo para Sistemas STBC-OFDM con Tres Antenas Transmisoras", *Universidad, Ciencia y Tecnología* v.13 n.50 Puerto Ordaz, 2009, [En línea]. Disponible en: http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-48212009000100009

[83] Gaussian Waves, "Characterizing a MIMO Channel - Channel State Information (CSI) and Condition number", *Gaussian Waves*, 2014, [En línea]. Disponible en: <https://www.gaussianwaves.com/2014/08/characterizing-a-mimo-channel/>

[84] Edfors, O., "Linear equalizer Zero-forcing equalizer", *Radio Systems ETIN15 - Lund University*, 20-04-2016, [En línea]. Disponible en: https://www.eit.lth.se/fileadmin/eit/courses/etin15/slides2017/Lecture08_Equalizers2017.pdf

[85] Björnson E., "Approaches to Mitigate Pilot Contamination", *Technical Insights - Massive MIMO*, 25-06-2017, [En línea]. Disponible en: <https://massive.ellintech.se/2017/06/25/approaches-to-mitigate-pilot-contamination/>

[86] Ran, R., Shanjin, N., Zhao, J., "Hexagonal Cellular Model With Pilot Contamination", *Analysis of Channel Estimation in Large-Scale MIMO Aided OFDM Systems with Pilot Design*, 01-05-2016, [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/figure/Hexagonal-cellular-model-with-pilot-contamination_fig1_305027573

[87] Zainudin, Ahmad & Sudarsono, Amang & Astawa, I Gede. (2014). Performance Analysis of an OFDM PHY Scheme with Zero Forcing Equalizer Using Software Defined Radio Platform and USRP. *EMITTER International Journal of Engineering Technology*. 2. 26-38. 10.24003/emitter.v2i1.15.