

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Grado

Análisis del canal MIMO masivo en interiores para su aplicación en 5G
(Analysis of the massive **MIMO** indoor channel for its applications in 5G)

Para acceder al Título de

***Graduado en
Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicación***

Autor: Alberto Baños Cerezo

Septiembre
- 2020



E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACION

GRADUADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS DE TELECOMUNICACIÓN

CALIFICACIÓN DEL TRABAJO FIN DE GRADO

Realizado por: Alberto Baños Cerezo

Director del TFG: Rafael Pedro Torres Jiménez.

Título: “Análisis del canal MIMO masivo en interiores para su aplicación en 5G”

Title: “Analysis of the massive MIMO indoor channel for its applications in 5G”

Presentado a examen el día: 19 de octubre de 2020

para acceder al Título de

GRADUADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS DE TELECOMUNICACIÓN

Composición del Tribunal:

Presidente: Rafael Torres Jiménez

Secretario: Luis Valle López

Vocal: Jesús Antonio Arce Hernando

Este Tribunal ha resuelto otorgar la calificación de:

.....

Fdo.: El Presidente

Fdo.: El Secretario

Fdo.: El Vocal

Fdo.: El Director del TFG
(sólo si es distinto del secretario)

Vº Bº del Subdirector

Trabajo Fin de Grado Nº
(a asignar por Secretaría)



Índice

1. Introducción y objetivos.....	10
1.1. Introducción	11
1.2. Objetivos.....	12
1.3. Estructura de la memoria.....	12
2. Metodología.....	13
2.1. Gestión del proyecto.....	14
2.2. Identificación de tareas.....	14
2.3. Diagrama temporal.....	15
3. Descripción de la tecnología MIMO	16
3.1. Introducción	17
3.2. Orígenes de la tecnología MIMO.....	17
3.2.1. Diversidad.....	17
3.2.2. Configuración del canal.....	17
3.2.3. Historia de la tecnología MIMO.....	20
3.3. Point-to-Point (P2P) MIMO:	21
3.3.1. Limitaciones de P2P MIMO:.....	22
3.4. MIMO Multi-Usuario (MU-MIMO):.....	23
4. MIMO de gran escala (L-MIMO).....	25
4.1. Introducción	26
4.1.1. Problemas de escalabilidad.....	26
4.2. MIMO de dimensiones completas (FD-MIMO):.....	27
4.3. MIMO Masivo (M-MIMO):.....	28
4.3.1. Estimación del canal.....	32
4.3.2. Control de potencia.....	34
4.3.3. Codificación y decodificación lineal.....	34
5. Caracterización de canales M-MIMO	37
5.1. Introducción	38
5.1.1. Up-link o M-MIMO MAC (Multiple Access Channel):	38
5.1.2. Down-link o M-MIMO BC (Broadcast):.....	39
5.2. Matriz H de canal.....	40
5.3. Capacidad del canal.....	40
5.3.1. Capacidad del canal Up-link.....	41
5.3.2. Capacidad del canal Down-link.....	41
5.4. Eficiencia espectral.....	43
6. Resultados	45
6.1. Introducción	46
6.2. Software.....	46
6.3. Sistema de medida.....	47
6.4. Capacidad del enlace.....	49
6.4.1. Entorno de medida.....	49



6.4.2.	Capacidad del Up-link	50
6.4.3.	Capacidad del Down-link	51
6.4.4.	Escala de la Capacidad del Down-link	53
6.5.	<i>Eficiencia espectral</i>	57
6.5.1.	Entorno de medida	58
6.5.2.	Normalización 1 (N1) o de tipo usuario	59
6.5.3.	Normalización 2 (N2) o de tipo global	61
6.5.4.	Comparación de los diferentes escenarios	63
7.	Conclusiones y líneas futuras	66
7.1.	<i>Conclusiones</i>	67
7.2.	<i>Líneas futuras</i>	68
	Bibliografía y referencias:	70



Índice de figuras

Figura 1: Diagrama de un sistema SISO [1].	18
Figura 2: Diagrama de un sistema SIMO [1].....	18
Figura 3: Diagrama de un sistema MISO [1].....	18
Figura 4: Diagrama de un sistema MIMO [1].	19
Figura 5: Comparación de las capacidades sobre canales Rayleigh de las diferentes configuraciones disponibles con 2 antenas, como máximo, en cada extremo [1].	19
Figura 6: Diagrama de un sistema P2P-MIMO [22].	22
Figura 7: Diagrama de un sistema MU-MIMO [23].....	23
Figura 8: Fundamento de modelado del canal en 3D en comparación con el clásico en 2D [10]. .	28
Figura 9: Ejemplo de configuración Down-link para la tecnología M-MIMO [7].....	29
Figura 10: Protocolo TDD para M-MIMO [9].....	32
Figura 11: Protocolo FDD para M-MIMO [7].	33
Figura 12: Comparación entre FDD y TDD para M vs K [7].	33
Figura 13: Diagrama del Up-link para representar la decodificación por filtros conjugados [7]...	35
Figura 14: Diagrama del Down-link para mostrar la codificación por haces conjugados [7].	35
Figura 15: Representación gráfica de M-MIMO MAC [22].	39
Figura 16: Representación gráfica de M-MIMO BC [22].....	39
Figura 17: Interfaz principal del software desarrollado por el GISAR.	46
Figura 18: Interfaz de la aplicación "Capacity"	47
Figura 19: Esquema del sistema constituido por el GISAR para las dos campañas de medidas [20], [21].....	48
Figura 20: Sala de conferencias en la que se ha llevó a cabo la sesión de medidas junto con el plano de la misma, incluyendo la distribución de los usuarios activos [20].	49
Figura 21: Capacidad del Up-link en función del número de antenas del array en la estación base.	50
Figura 22: Capacidad del Up-link en función de la SNR del enlace.	50
Figura 23: CDF de la capacidad para el UP-link.	51
Figura 24: Capacidad del Down-link en función del número de antenas del array en la estación base.....	52



Figura 25: Capacidad del Down-link en función de la SNR del enlace.....	52
Figura 26: CDF de la capacidad para el Down-link.....	53
Figura 27: Capacidad del Down-link en función del número de antenas de la estación base tras escalar el valor de la SNR.	54
Figura 28: Capacidad del Down-link en función de la SNR del enlace tras escalar dicho valor.	54
Figura 29: CDF de la capacidad para el Down-link tras escalar el valor de la SNR.....	55
Figura 30: Capacidades tanto del Down-link como del Up-link en función del número de antenas del array en la estación base tras escalar el valor de la SNR para el Down-link.	55
Figura 31: Capacidades del Down-link y del Up-link en función de la SNR del enlace tras escalar dicho valor para el Down-link.	56
Figura 32: CDF de la capacidad tanto para el Down-link como para el Up-link tras escalar el valor de la SNR para el Down-link.....	56
Figura 33: A la izquierda, el primer escenario de la campaña de medidas; a la derecha, el segundo [20].....	58
Figura 34: CDFS de la eficiencia espectral y capacidad acumulada para el escenario 1 en situación de LOS con antenas omnidireccionales.	59
Figura 35: CDFS de la eficiencia espectral y capacidad acumulada para el escenario 1 en situación de LOS con antenas directivas.	59
Figura 36: CDFS de la eficiencia espectral y capacidad acumulada para el escenario 1 en situación de NLOS para antenas omnidireccionales	60
Figura 37: CDFS de la eficiencia espectral y capacidad acumulada para el escenario 1 en situación de NLOS para antenas directivas.	60
Figura 38: CDFS de la eficiencia espectral y capacidad acumulada para el escenario 2 con antenas omnidireccionales	60
Figura 39: CDFS de la eficiencia espectral y capacidad acumulada para el escenario 2 con antenas directivas.	60
Figura 40: CDFS de la eficiencia espectral y capacidad acumulada para el escenario 1 en situación de LOS con antenas omnidireccionales.	62
Figura 41: CDFS de la eficiencia espectral y capacidad acumulada para el escenario 1 en situación de LOS con antenas directivas.	62
Figura 42: CDFS de la eficiencia espectral y capacidad acumulada para el escenario 1 en situación de NLOS con antenas omnidireccionales.	62
Figura 43: CDFS de la eficiencia espectral y capacidad acumulada para el escenario 1 en situación de NLOS con antenas directivas.	62
Figura 44: CDFS de la eficiencia espectral y capacidad acumulada para el escenario 2 con antenas omnidireccionales.	62



Figura 45: CDFS de la eficiencia espectral y capacidad acumulada para el escenario 2 con antenas directivas. 62

Figura 46: CDFS de las eficiencias espectrales totales del escenario 1 en situación de LOS. 64

Figura 48: CDFS de las eficiencias espectrales totales del escenario 2. 65



Índice de tablas

Tabla 1: Diagrama temporal para mostrar el desarrollo de las actividades de este TFG en el tiempo..... 15

Tabla 2: Datos significativos en bits/s/Hz de la simulación haciendo uso de la normalización N1 para los escenarios uno (rojo) y dos (azul)..... 60

Tabla 3: Datos significativos en bits/s/Hz de la simulación haciendo uso de la normalización N2 para los escenarios uno (rojo) y dos (azul)..... 63



Glosario de abreviaturas

1D	Una Dimensión
2D	Dos Dimensiones
4G	Cuarta Generación de comunicaciones
5G	Quinta Generación de comunicaciones
BS	Base Station (<i>Estación base</i>)
BC	Broadcast
CDF	Cumulative Distribution Function (<i>Función de distribución acumulativa</i>)
CSI	Channel State Information (<i>Información sobre el estado del canal</i>)
CTF	Complex Channel Transfer Function (<i>Función de transferencia de canal compleja</i>)
dB	Decibelio
DCh	Directive Channel
FDD	Frequency Division Duplex (<i>Duplexado por división de frecuencia</i>)
FD-MIMO	Full Dimension MIMO (<i>MIMO de dimensiones completas</i>)
GHz	Giga Hertzio
GISAR	Grupo de Ingeniería de Sistemas, Antenas y Radiopropagación
IoT	Internet of Things (<i>Internet de las cosas</i>)
LOS	Line Of Sight (<i>Línea de visión</i>)
LTE	Long Term Evolution (<i>Evolución a largo plazo</i>)
MAC	Multiple Access Channel (<i>Canal de acceso múltiple</i>)
MIMO	Multiple Input, Multiple Output (<i>Múltiple entrada, múltiple salida</i>)
FD-MIMO	Full Dimension MIMO (<i>MIMO de dimensiones completas</i>)
L-MIMO	Large MIMO (<i>MIMO de gran escala</i>)
M-MIMO	Massive MIMO (<i>MIMO masivo</i>)
MU-MIMO	Multi-User MIMO (<i>MIMO multi-usuario</i>)
P2P-MIMO	Point to Point MIMO (<i>MIMO punto a punto</i>)
MIMO-OFDM	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing MIMO (<i>MIMO con multiplexado por división de frecuencia</i>)
MIMO-OFDMA	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing Access MIMO (<i>MIMO con acceso con multiplexado por división de frecuencia</i>)
MISO	Multiple Input, Single Output (<i>Múltiple entrada, salida única</i>)
M2M	Machine to Machine (<i>Máquina a máquina</i>)
NLOS	Not Line Of Sight (<i>Sin línea de visión</i>)
OCh	Omnidirectional Channel (<i>Canal omnidireccional</i>)
P2P	Point to Point (<i>Punto a punto</i>)
QAM	Quadrature Amplitude Modulation (<i>Modulación de amplitud en cuadratura</i>)
SNR	Signal to Noise Ratio (<i>Relación señal a ruido</i>)
SINR	Signal to Interference plus Noise Ratio (<i>Relación señal a ruido más interferencia</i>)
SIMO	Single Input, Multiple Output (<i>Entrada única, salida múltiple</i>)
SISO	Single Input, Single Output (<i>Entrada única, salida única</i>)
TFG	Trabajo de Fin de Grado
TDD	Time Division Duplex (<i>Duplexado por division temporal</i>)



UT
WLAN

Usuario Activo
Wireless Local Area Network (*Red de área local inalámbrica*)



Agradecimientos

En primer lugar, este TFG es en buena medida de mis padres, por todo su apoyo y dedicación durante todos estos años. Gracias de todo corazón.

También es de toda la gente que ha conseguido que esta carrera merezca la pena. A todos mis compañeros a los que ahora llamo amigos, ya sea aquí o en Suecia, por todos los buenos y malos momentos.

Tiene buena parte de Rafa, por confiar en mí. Sin su ayuda y paciencia esto no habría sido posible.

Finalmente, me gustaría hacerle una mención especial a la persona por la que hoy me convierto en Ingeniero. Un ser humano excepcional que tendría que estar aquí hoy para verlo. Por ello, este TFG va dedicado a Celso Iglesias.



1. Introducción y objetivos

1.1. Introducción

A lo largo de los últimos años, el número de dispositivos conectados a las redes móviles ha incrementado considerablemente, lo que ha causado que el tráfico de datos se haya disparado, el cual ya no está copado únicamente por *smartphones* y otros sistemas inalámbricos de comunicaciones, sino que cada vez se comparte más y más con dispositivos de todo tipo, desde electrodomésticos hasta vehículos autónomos, pasando por robots industriales o sensores para aplicaciones diversas.

Es por ello por lo que el avance tecnológico preste especial atención en actualizar las redes de comunicaciones actuales con el fin de mejorarlas y así hacerlas capaces de cumplir con los adelantos que están por venir. En este marco surge la quinta generación de redes móviles, también conocida como 5G, que traerá una serie de mejoras que pasan por un aumento de la banda ancha móvil, así como un incremento de la velocidad de la misma, haciendo posible establecer comunicaciones mucho más fiables con tiempos de latencia notablemente mejorados. Todas estas mejoras traerán consigo comunicaciones masivas de máquina a máquina (M2M) que permitirán desarrollar el conocido como Internet de las Cosas (IoT, siglas que provienen de su nombre en inglés, *Internet of Things*), lo que en definitiva supondrá la interconexión de la mayoría de los objetos cotidianos con Internet, con el fin de que las diferentes tecnologías se integren en un único servicio que tiene como centro al usuario.

A pesar de lo prometedor de estas nuevas tecnologías, todo avance trae consigo una serie de retos técnicos que se han de superar antes de su implementación. Las innovaciones tecnológicas del 5G se apoyan en las infraestructuras de las comunicaciones móviles ya existentes, pero actualizadas para poder adaptarse a las nuevas necesidades del estándar. Una de las tecnologías que posibilitarán la última generación de la red de comunicaciones móviles es el uso de múltiples antenas tanto en el receptor como en la estación base transmisora, configuración que se conoce como MIMO (siglas que provienen de su nombre en inglés, *Multiple-Input Multiple-Output*), que permite mejorar la fiabilidad del sistema, así como su capacidad mediante el aprovechamiento de la diversidad espacial y los múltiples caminos de propagación. El estudio que se va a presentar a continuación se va a centrar en la versión más desarrollada de esta configuración, el **MIMO masivo**, que implementa centenares de antenas en la estación para tales fines.

En la actualidad, empresas del sector privado y organismos públicos están volcando la mayor parte de sus inversiones para poder desarrollar esta y otras tecnologías que harán posible que el 5G se vaya implantando en los años venideros. En España, el **Plan Nacional del 5G** marca el plan de actuación del Gobierno a la hora de impulsar el despliegue de redes y desarrollar dicha tecnología bajo el paraguas del **Ministerio de Asuntos Económicos y Transformación Digital**, y cuya hoja de ruta estima el comienzo del despliegue de la red para este año 2020.



1.2. Objetivos

El objetivo principal de este TFG es el de contribuir al estudio de los parámetros de un canal MIMO masivo en interiores de forma analítica haciendo uso del software MATLAB, a partir de las campañas de medidas llevada a cabo por el grupo GISAR del Departamento de Ingeniería de Comunicaciones de la Universidad de Cantabria. Los parámetros que se van a estudiar son el de la capacidad en base al número de antenas en la estación base y en base a la SNR del canal, así como la CDF de la capacidad, todo ello con el fin de igualar para el Down-link los valores de capacidad que se alcanzan el Up-link y suponiendo que el número de usuarios al que la estación base da servicio es de 16 usuarios. La banda de frecuencia en la que se van a centrar los resultados de este trabajo es la que va de los 3.2 a los 4 GHz. En esta misma banda, pero en otro escenario se va a analizar la eficiencia espectral y cómo le afecta a este parámetro la existencia o no de línea de visión, así como el uso de antenas direccionales u omnidireccionales en la estación base.

1.3. Estructura de la memoria

La memoria que aquí se presenta se divide en 7 secciones, los cuales se dividen a su vez en diferentes subsecciones y cuyo contenido se presenta a continuación:

- Sección 2: descripción del trabajo efectuado a lo largo del proyecto.
- Sección 3: introducción a la configuración de canal MIMO
- Sección 4: introducción a la tecnología MIMO a gran escala, así como presentación en detalle de la configuración MIMO masiva.
- Sección 5: presentación de los parámetros que permiten caracterizar el canal M-MIMO, de los cuales se van a obtener los resultados.
- Sección 6: presentación de los resultados obtenidos, así como comentarios sobre los mismos.
- Sección 7: extracción de conclusiones y proposición de las posibles líneas futuras de estudio.



2. Metodología



2.1. Gestión del proyecto

Las líneas más generales que ha seguido este proyecto han sido principalmente dos: una primera más teórica centrada en entender las características fundamentales del canal MIMO Masivo, para así poder pasar a una segunda en la que los resultados basados en medidas experimentales que se van a presentar en este TFG. A su vez, estas dos fases se dividen en una serie de tareas que se explicaran con más detalle en la Sección 2.2. Una vez finalizada la primera fase y en paralelo con la segunda, se procedió a la redacción de este documento.

En la primera fase, se ha procedido a la búsqueda de información sobre los aspectos relacionados con la tecnología MIMO con el fin de obtener un mejor conocimiento del objeto de estudio de este proyecto: antecedentes e historia de su desarrollo, fundamentos matemáticos, investigaciones previas, situación actual de la tecnología, líneas futuras... Más en concreto, se va a prestar particular interés a la tecnología MIMO masiva, considerada hoy en día como uno de los pilares fundamentales para la implantación de la tecnología 5G.

En la segunda fase, centrada en la práctica y obtención de resultados, el trabajo se ha centrado en operar con el *script* de MATLAB proporcionado por el grupo GISAR, así como una serie de medidas realizadas por este grupo que han permitido llevar a cabo el estudio que permitiría caracterizar el canal indoor en la banda de 3.2 a 4 GHz al usar la configuración de MIMO masivo. Para ello, se llevaron a cabo una serie de simulaciones con el fin de obtener los parámetros que permitieran la extracción de conclusiones en cuanto al comportamiento de dicho canal con la configuración mencionada. Otra de las tareas principales fue la de adaptar el *script* para que simulara el comportamiento tanto del Up-link como del Down-link, puesto que estaba programado para simular solo el primero.

2.2. Identificación de tareas

Las tareas llevadas a cabo a lo largo de estos meses son las siguientes:

1. Documentación bibliográfica y lectura de *papers*.
2. Familiarización con el *script* de MATLAB.
3. Modificación del mismo para poder simular tanto el Up-link como el Down-link.
4. Extracción de las gráficas que representan los parámetros seleccionados para caracterizar el canal MIMO masivo.
5. Obtención del factor de escala para equiparar las capacidades del Down-link a las del Up-link.
6. Estudio y obtención de los resultados para el parámetro eficiencia espectral.
7. Extracción de conclusiones.
8. Redacción de este documento usando el programa Word.



2.3. Diagrama temporal

Tabla 1: Diagrama temporal para mostrar el desarrollo de las actividades de este TFG en el tiempo.

Tarea	Febrero	Marzo	Abril	Junio	Julio	Agosto	Septiembre
1	X X X				X X X		
2	X X						
3		X X X					
4			X X X	X X X	X		
5					X X		
6					X	X X X	
7							X X
8					X X X	X X X	X X X X



3. Descripción de la tecnología MIMO



3.1. Introducción

Las siglas de MIMO hacen referencia a su nomenclatura inglesa *Multiple-Input Multiple-Output* (en español, Múltiple Entrada, Múltiple Salida), y hacen referencia a una tecnología que se sirve del uso de múltiples antenas, tanto en la estación transmisora como en la receptora, para así incrementar la eficiencia espectral de los sistemas de comunicaciones inalámbricos. El principio fundamental de MIMO es el de aprovechar la propagación multicamino, que hasta el momento era considerada como un agravante para las comunicaciones inalámbricas, haciendo uso de las múltiples señales que se propagan simultáneamente y a la misma frecuencia por un mismo canal de radiofrecuencia para así multiplicar la capacidad de dicho canal. Así, haciendo uso de diversidad de antenas en conjunto con complejos algoritmos de tratamiento digital de señales en ambos puntos del radioenlace, consigue impulsar la velocidad de transmisión, el caudal efectivo, el rango y la fiabilidad del sistema, todo ello sin necesidad de un mayor ancho de banda ni de incrementar la potencia transmitida.

3.2. Orígenes de la tecnología MIMO

3.2.1. Diversidad

Se conoce como diversidad a la propagación de múltiples copias de la señal transmitida a través del canal de comunicación. La diversidad puede ser de diferentes tipos en función de dónde se produzca:

- **Diversidad temporal:** cuando se transmiten varias copias de la señal en instantes diferentes.
- **Diversidad espacial:** cuando se transmite la señal por caminos de propagación diferentes.
- **Diversidad frecuencial:** cuando la señal se transmite haciendo uso de canales frecuenciales diversos.
- **Diversidad de polarización:** cuando se transmiten varias copias de la señal haciendo uso de polarizaciones diferentes.
- **Diversidad de usuario:** cuando el transmisor es el que elige el mejor receptor de entre los disponibles en función de la capacidad del canal.

Como se mencionaba previamente, el MIMO tiene su origen en la diversidad espacial, que se propone en sus orígenes como una técnica que aspira a solventar los problemas de la propagación multicamino, algo que hasta el momento se había considerado como algo pernicioso y agravante a la hora de transmitir información a través de un radioenlace.

3.2.2. Configuración del canal

Para entender mejor la tecnología MIMO y el por qué de su utilización en las redes de comunicaciones de la actualidad, es interesante hacer un estudio de las diferentes configuraciones de canal que existen en la actualidad. Estas vienen definidas por el número de antenas que se utilizan en las estaciones transmisora y receptora.

1. Canal SISO (*Single-Input Single-Output*): sistemas que utilizan una sola antena tanto en la estación transmisora como en la receptora. La capacidad que proporcionan es inferior a la del resto, pero son sistemas mucho más simples.

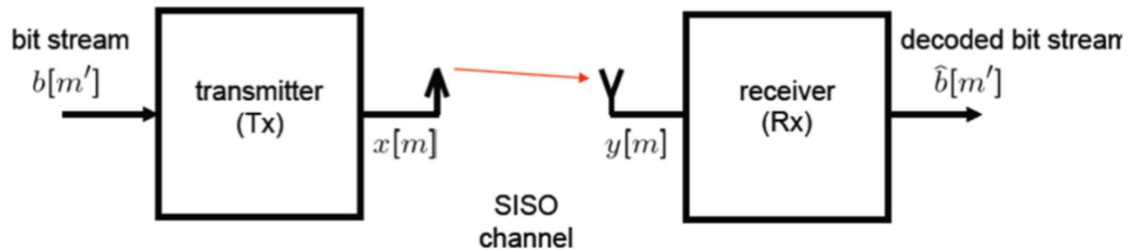


Figura 1: Diagrama de un sistema SISO [1].

2. Canal SIMO (*Single-Input Multiple-Output*): este tipo de sistemas utilizan una única antena en la estación transmisora, y dos o más en la receptora. El número de canales resultante es igual al número de antenas en la estación receptora. La capacidad se incrementa principalmente a causa de la diversidad espacial [1].

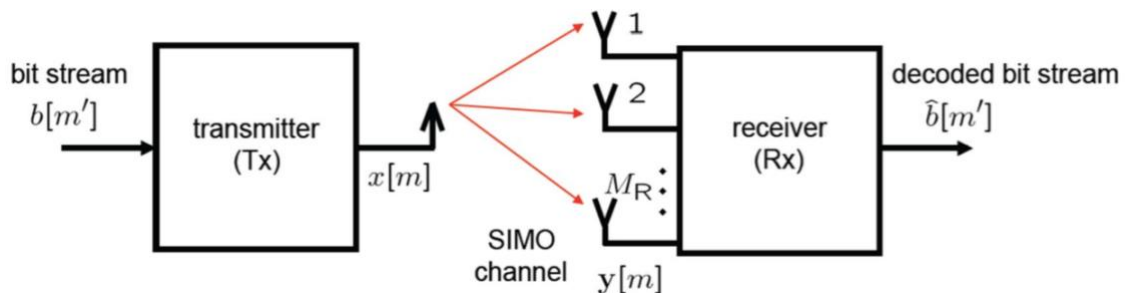


Figura 2: Diagrama de un sistema SIMO [1].

3. Canal MISO (*Multiple-Input Single-Output*): al contrario de los anteriores, estos sistemas utilizan dos o más antenas en la estación transmisora, y una única en la receptora. Aunque la capacidad sigue siendo mayor que la de los sistemas SISO, esta es inferior a la de los canales SIMO [1].

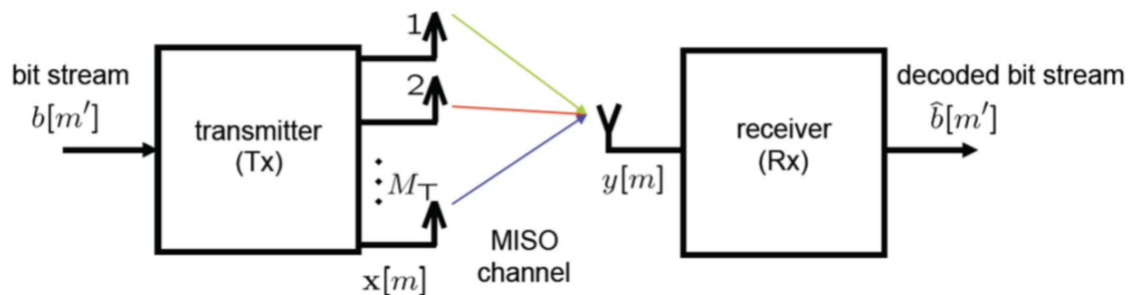


Figura 3: Diagrama de un sistema MISO [1].

4. Canal MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*): el objeto de estudio de este proyecto, son sistemas, como ya se ha comentado previamente, con dos o más antenas tanto en la estación emisora como en la receptora. El número de canales resultante es el producto de las antenas en cada uno de los extremos del enlace.

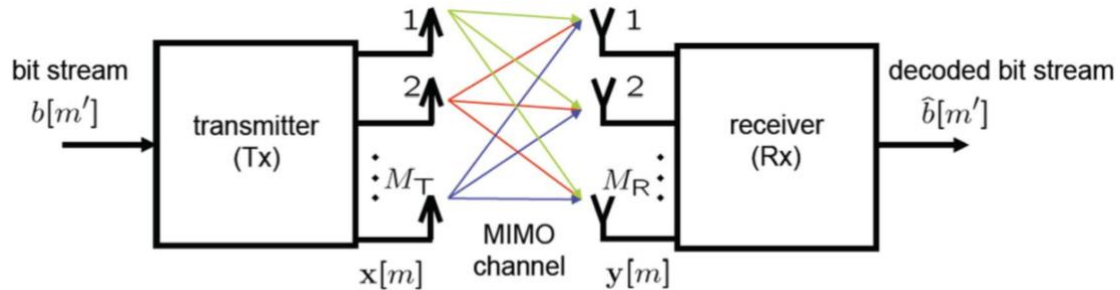


Figura 4: Diagrama de un sistema MIMO [1].

Estos sistemas son los que más capacidad proporcionan en comparación con los anteriores para un mismo ancho de banda y potencia transmitida. Como se aprecia en el ejemplo de la Figura 5, utilizando únicamente dos antenas en transmisión y recepción, como podría ser el caso por separado de las tecnologías MISO o SIMO, respectivamente. Es por ello por lo que la mayor parte de las investigaciones de los últimos años se hayan centrado en esta tecnología.

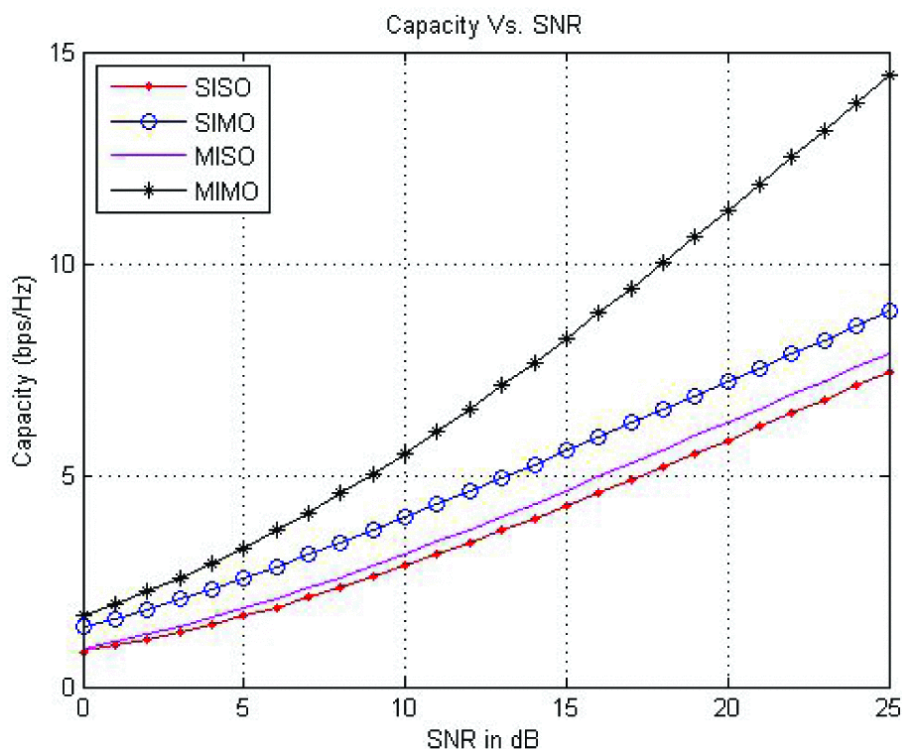


Figura 5: Comparación de las capacidades sobre canales Rayleigh de las diferentes configuraciones disponibles con 2 antenas, como máximo, en cada extremo [1].



3.2.3. Historia de la tecnología MIMO

Los sistemas MIMO tiene su origen en uno de los diferentes tipos de diversidad que se mencionaban en la Sección 3.2.1: la diversidad espacial mediante el uso de múltiples antenas, lo que se conoce como diversidad de antena, la cual tiene sus orígenes en los experimentos de Harold H. Beverage y Harold O. Peterson, quienes, tras darse cuenta de que estaciones de radiodifusión separadas aproximadamente media milla entre sí recibían la misma señal con una gran diferencia de robustez. Debido a esto, decidieron tratar de evitar el *fading*, el cual achacaron a la propagación multicamino, desarrollando un sistema que combinaba la señal recibida en dos antenas diferentes, que experimentalmente concluyeron debían estar al menos a una longitud de onda de separación, y así conseguían recibir una señal con una mayor calidad de audio. Esto resultó en 1941 en la presentación de un sistema de recepción de señales de radio con dos antenas que recibían a 300 y 1000 Hz, alternadas por una *switch*, presentando una señal media con cierta inmunidad al mencionado *fading*, experimentos que culminaron en 1959, cuando la circuitería radio se fue sofisticando en conjunto con un mejor entendimiento del procesado de señales, dando lugar a versiones perfeccionadas del receptor único con diversidad de antenas propuesto en el 1941 [2].

Estos experimentos, junto con los avances en el estudio de la diversidad de canal que se llevaron a cabo entre las décadas de los 70 y de los 80 fueron fundamentales para sentar las bases de tres *papers* que se presentaron en la década de los 90 y que tuvieron como resultado el desarrollo de la tecnología MIMO. El primero de ellos fue presentado en 1996 por G. J. Foschini en los Laboratorios Bell, donde planteaba la ya clásica fórmula para la capacidad

$$C_U = \log_2 \left[\mathbf{I} + \frac{\rho}{M} \mathbf{H}\mathbf{H}^* \right] \quad (1)$$

donde \mathbf{I} es la matriz identidad, ρ denota la SNR para una sola antena, y el $*$ simboliza la transpuesta conjugada.

En esta primera aproximación, se asumía que el transmisor no sabía nada acerca de la función de transferencia multiantena \mathbf{H} entre él y el receptor. No obstante, una serie de asunciones acerca de \mathbf{H} le permitieron llegar a la conclusión de que la oportunidad que se planteaba de transmitir a altos *data rates* utilizando radios con múltiples antenas era enorme [3].

El segundo llegaría en 1998 de la mano de Raleigh y Cioffi, quienes afirmaron que, si el transmisor conocía las características del canal, se podrían alcanzar capacidades superiores, haciendo así una conexión bastante potente entre las capacidades disponibles y los valores singulares de la función de transferencia \mathbf{H} [4]. De este modo, se llegó a la conclusión de que, combinando la propagación multicamino con sistemas multi-antena capaces de transmitir formas de onda únicas para cada una de las antenas, se creaban una serie de modos de comunicación ortogonales por los que transmitir información de forma independiente, lo que centró los estudios de los años venideros en caracterizar la función de transferencia \mathbf{H} en entornos de propagación realistas utilizando diferentes diseños de antenas [2].

Finalmente, en ese mismo año Alamouti demostró un esquema de diversidad de transmisión, el cual proporcionaba un *precoding* óptimo a la hora de transmitir cuando la estación base no conocía la información acerca de la función de transferencia \mathbf{H} [5].

En los años intermedios entre los primeros estudios de Beverage y Peterson y los de las publicaciones comentadas en los anteriores párrafos, la mayoría de los estudios en el ámbito de la propagación electromagnética se centraban tanto en la correlación entre las señales transmitidas por dos antenas, así como en caracterizar el *delay* del canal de comunicaciones. Tras las publicaciones de 1996 y 1998 y el descubrimiento del potencial de la configuración MIMO, se llegó a la conclusión de que alcanzar el conocimiento acerca de las propiedades espaciales de la propagación multicamino podría llevar a la elaboración de antenas que aprovecharan esas propiedades para así potenciar los modos de comunicación.

Así, en el año 2001 la compañía Iospan Wireless Inc. crea el primer sistema comercial que usaba la tecnología MIMO-OFDMA. Posteriormente, múltiples empresas del sector empiezan a desarrollar dispositivos WLAN que aportan soluciones basadas en la tecnología MIMO-OFDM, el denominado estándar WLAN 802.11 Pre-N, que concluiría en el año 2009, cuando se completa el protocolo WLAN 802.11n, el cual se basa en la tecnología MIMO para así alcanzar un rendimiento en la capa MAC de 100 Mb/s [6]. Actualmente, el estándar MIMO más avanzado es el 802.16m, el cual permite alcanzar un rendimiento de 1 Gb/s.

En la actualidad, la tecnología MIMO-OFDM se utiliza en los servicios de cuarta generación LTE, con más de 360 redes en 123 países y con un aproximado de 370 millones de dispositivos conectados. Asimismo, se está estudiando la posibilidad de usar una versión con centenares de antenas en cada una de las estaciones base, el conocido como **MIMO masivo**, y que se considera hoy en día como uno de los pilares de la quinta generación de comunicaciones.

3.3. Point-to-Point (P2P) MIMO:

La planteada como forma original de la tecnología MIMO, consiste en un enlace en el que la estación transmisora se compone de un *array* concentrado de M antenas, la cual transmite a un usuario que conforma la estación receptora, que a su vez consta de otro *array* concentrado de antenas, en este caso de dimensión K , de modo que cada una de las antenas receptoras está sujeta a la acción combinada de todas las antenas transmisoras. [7], [8].

Todos los usos del canal implican transmitir y recibir un vector de señal, donde cada una de las señales recibidas es la combinación lineal de las señales transmitidas, de modo que los coeficientes de combinación se determinan por la propagación entre los dos extremos del enlace. De acuerdo con la teoría de Shannon, la capacidad del enlace alcanza sus mejores prestaciones para el Down-link si el transmisor conoce la matriz de canal. Por su parte, el receptor no tiene por qué conocer dicha matriz. Para el Up-link, sería el caso contrario, puesto que la estación base pasaría a ser el receptor. No obstante, si ambos extremos del enlace conocieran el estado del canal tanto en el caso del Down-link como en el del Up-link, la operación se vería simplificada y mejoraría el rendimiento. Para conocer el estado del canal influye también el tipo de duplexado que se utiliza, ya que, si

se hace por división en frecuencia, lo que se conoce como sistemas FDD, el canal para el Up-link es diferente al de el Down-link. Sin embargo, si la división se hace en tiempo, los llamados sistemas TDD, el canal para el Up-link es teóricamente igual al del Down-link, debido a la condición de reciprocidad [7].

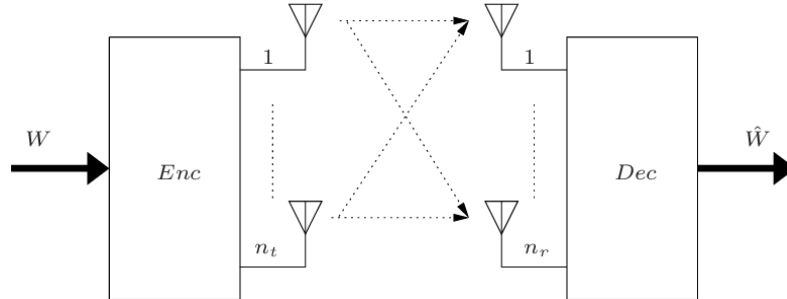


Figura 6: Diagrama de un sistema P2P-MIMO [22].

Para que el receptor sea capaz de conocer el estado del enlace, y poder alcanzar el conocimiento de la matriz de canal, el transmisor tiene que enviar una serie de señales de entrenamiento a través de dicho canal, lo que se conoce como *pilotos*. De este modo, la duración de las muestras que conforman las secuencias de pilotos enviados por el transmisor, τ_d , debe ser mayor o igual que el número de antenas en la estación base, M . Asimismo, el enlace Up-link requiere que la estación base conozca el estado de dicho enlace, de modo que, para que pueda establecer la matriz del canal Up-link, la estación receptora también tiene que mandar una serie de pilotos a través de este canal con una duración, τ_u , que de nuevo tiene que superar el número de antenas, en este caso, en la estación receptora, K . En conclusión, la duración total del tiempo de transmisión para un sistema tanto FDD como TDD completo es

$$\tau_u + \tau_d \geq M + K \quad (2)$$

En resumen, el principio de la tecnología P2P MIMO se basa en que el receptor transmite un vector de señal, conformado por diferentes porciones que unidas dan lugar al conjunto de la información que se envía, el cual se multiplica por la función de transferencia del canal, dando lugar al vector de señal que alcanzar la estación receptora. Cuanto mejor sea la estimación de canal, más fácil lo tendrá el receptor para recuperar la información enviada por el transmisor [7].

3.3.1. Limitaciones de P2P MIMO:

La tecnología P2P MIMO es la opción elegida por múltiples estándares inalámbricos, como el 802.11ac, por ejemplo, que alcanza una configuración $(M, K) = (8, 8)$. No obstante, esta tecnología es difícilmente escalable más allá de esta configuración, debido a las razones que se exponen a continuación.

La primera es el entorno de propagación, puesto que no puede soportar ocho flujos de transmisión de datos. Más en particular, las condiciones LOS (*Line Of Sight*, en español, Línea De Visión) presentan un caso particularmente complejo, ya que, para *arrays* compactos, la matriz de canal tiene un rango mínimo de uno que solo permite un

único flujo de transmisión. La segunda es el tiempo requerido para el entrenamiento de las estaciones transmisora y receptora, puesto que incrementar el número de antenas en cualquiera de los dos extremos del enlace supondría incrementar dicho tiempo de manera proporcional, como se indica en la Ecuación (2). Otra de las razones es el hecho de que la SINRs en los límites de celda son típicamente bajas, lo que impide alcanzar los máximos esperados para la ganancia de multiplexado. Finalmente, el último de los impedimentos es la complejidad de los sistemas, ya que alcanzar los límites de Shannon requiere procesado de señal en ambos extremos del enlace, lo que supone electrónica independiente para cada una de las antenas [7].

3.4. MIMO Multi-Usuario (MU-MIMO):

Partiendo del esquema que resulta para la tecnología P2P MIMO, si, en vez de tener un receptor con K antenas concentradas en un mismo bloque, se separan todas estas en K receptores únicos e independientes, cada uno con una de las antenas, surge así la configuración de MIMO Multi-Usuario, o MU-MIMO, que difiere de la P2P MIMO en que los terminales receptores están separados por múltiples longitudes de onda, y que dichos terminales, al ser independientes, no pueden colaborar entre sí al no poder comunicarse entre ellos. Estos simplemente se limitan a recibir y transmitir información a la estación base [8], como se aprecia en la Figura 7.

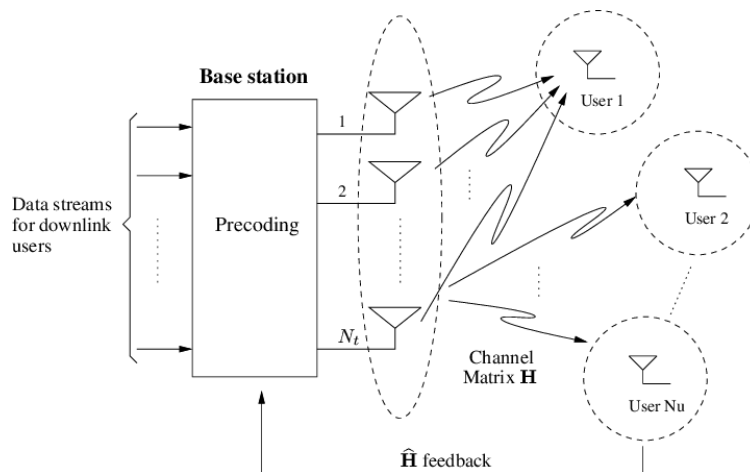


Figura 7: Diagrama de un sistema MU-MIMO [23].

El hecho de separar las antenas receptoras en combinación con la independencia entre estas puede provocar que el rendimiento que cada uno de los usuarios puede alcanzar individualmente se vea notablemente afectado en malas condiciones de canal. No obstante, llama la atención que el rendimiento acumulado (la suma de los rendimientos individuales de cada uno de los usuarios) no se vea agravado por la separación al hacer ciertas asunciones acerca del CSI (Información sobre el Estado del Canal, de sus siglas en inglés, *Channel State Information*).

Mientras que la capacidad del Up-link se mantiene igual que para el caso del P2P MIMO, ya que la estación base es la que tiene que conocer la matriz de canal, y sigue recibiendo lo mismo que en la configuración P2P, en el caso del Down-link la capacidad se incrementa debido al hecho de que cada uno de los usuarios K solo tiene que conocer su canal, puesto que ahora son independientes. Antes, el receptor tenía que tener la



información acerca del estado del canal entero [7]. A pesar de esto, el tiempo de entrenamiento del canal para alcanzar un CSI óptimo sigue siendo el mismo que para P2P MIMO, el que se presentaba en la Ecuación (2).

Las ventajas que trae MU-MIMO por encima del P2P MIMO suponen que únicamente se utilicen terminales receptores con una sola antena, con los consiguientes beneficios en términos de simplicidad y costes, puesto que solo se requiere del equipo con alto coste en la estación base; así como una menor vulnerabilidad a los entornos de propagación gracias a la diversidad multiusuario, ya que MU-MIMO puede llegar a funcionar incluso en las situaciones de LOS que perjudicaban a P2P MIMO. Esto deja un mejor entorno de propagación, requisito indispensable para poder obtener un mayor aprovechamiento de la ganancia de multiplexado [7], [9].

No obstante, MU-MIMO como tal sigue sin ser escalable debido a que, de nuevo, el tiempo que requiere obtener el CSI sigue creciendo proporcionalmente al número de antenas en la estación base y al número de usuarios a los que se da servicio. Además, alcanzar los límites de Shannon para la capacidad supone un codificado y decodificado que utiliza la técnica conocida como *Dirty Paper Coding*, cuya complejidad aumenta exponencialmente al incrementar las dimensiones del MU-MIMO, haciendo su carga computacional demasiado pesada [7].



4. MIMO de gran escala (L-MIMO)



4.1. Introducción

El rendimiento de todos los sistemas MIMO depende de las propiedades de sus antenas, así como de la complejidad del entorno de propagación. La capacidad que poseen estos sistemas para explotar estas circunstancias es lo que limita el rendimiento que se pueda alcanzar. Los sistemas MIMO de las secciones anteriores usan configuraciones que en sus correspondientes estándares se ven limitadas a configuraciones con $(M, K) = (8, 8)$ antenas. La tecnología que se va a presentar en esta sección busca superar esas limitaciones y poder explotar al máximo el canal de propagación aprovechando la subida en la ganancia de capacidad que resulta al aumentar el tamaño de la matriz de canal. Con antenas ideales separadas de un modo adecuado en un entorno de propagación lo suficientemente complejo sin directividad ni acoplo entre antenas, cada una de las antenas añadidas supondría un nuevo grado de libertad que el sistema podría aprovechar, al tiempo que se reduciría el impacto que puedan tener problemas aleatorios, como puede ser el ruido térmico o la interferencia cocanal. Así, se podrían establecer enlaces mayor fiabilidad con mejores *data rates*, logrando un mejor equilibrio entre las eficiencias espectral y energética [8], [10].

Esta nueva tecnología, que se conoce como MIMO de gran escala (L-MIMO por su nombre en inglés, *Large MIMO*) surge con el fin de alcanzar tales objetivos, a pesar de que las condiciones ideales nunca se den en la realidad: las antenas nunca son ideales ni están separadas lo suficiente, del mismo modo que el entorno nunca es lo suficientemente complejo, lo que implica que no se pueda alcanzar el máximo número de grados de libertad que teóricamente deberían estar a disposición del transmisor.

L-MIMO abarca tecnologías como el MIMO de dimensiones completas (FD-MIMO por su nombre en inglés, *Full Dimension MIMO*) o el MIMO masivo (M-MIMO por su nombre en inglés, *Massive MIMO*).

4.1.1. Problemas de escalabilidad

Para tratar de superar los problemas de escalabilidad planteados por las tecnologías MIMO P2P y, sobre todo, MU, surge una nueva variante de esta última, la tecnología conocida como **Large MIMO**, considerada como una de las bases sobre las que desarrollar la quinta generación de comunicaciones. Esta tecnología rompe con los problemas de las otras dos incrementando el tamaño de la estación transmisora del sistema sin tratar de aproximarse al máximo al límite de Shannon, y separándose de la teoría de éste en tres aspectos:

- Primero, únicamente la estación base aprende el canal existente para el Down-link, de modo que usando TDD, el tiempo necesario para adquirir la CSI es independiente del número de antenas en la estación base, M [7].
- Segundo, este número de antenas se incrementa sustancialmente, por lo general, a un número que supera en gran medida al número de usuarios a los que da servicio [7].



- Finalmente, en el Down-link se utiliza un multiplexado por codificación lineal, combinado con un demultiplexado del mismo tipo en el Up-link, lo que otorga un rendimiento que se aproxima al límite de Shannon [7].

4.2. MIMO de dimensiones completas (FD-MIMO):

Una de las principales líneas de estudio planteadas en el salto de la tercera a la cuarta generación de comunicaciones fue la de alcanzar la construcción de estaciones base con hasta 64 antenas colocadas en forma de matriz de dos dimensiones (2D). Se conseguía así dar los primeros pasos para superar el límite de 8 antenas transmisoras, necesario para el desarrollo de la tecnología LTE. De este modo, se cumplimentaban las necesidades de la 4G al mejorarse drásticamente los requerimientos de multiplexado de usuario y en la conformación del haz de elevación [11]. Este *array* de dos dimensiones permitía a las estaciones base dar servicio en vertical con haces dirigidos hacia arriba y hacia abajo, al tiempo que se explota el dominio en acimut para atender a usuarios situados a izquierda y derecha de la estación base [10].

Uno de los aspectos más significativos del FD-MIMO es que rompía con la barrera de las 8 antenas de MU-MIMO, alcanzando bloques de 16, 32 y hasta 64 antenas. Uno de los principales motivos que hacen esto posible es el *array* en dos dimensiones que antes se mencionaba. Al pasar de 1D a 2D se podrían construir bloques mucho más prácticos y de menores dimensiones: trabajando a 2.5 GHz, si se plantea la máxima configuración alcanzable, 64 antenas, colocadas en forma de matriz 8x8, con una separación de media longitud de onda entre ellas, el bloque resultante es de 50 cm x 50 cm, mientras que usando la configuración en una dimensión resultaría en un haz de antenas vertical de cuatro metros de longitud. Esta configuración, además de la visible practicidad de dimensiones, permite que los elementos activos de las antenas puedan proporcionar un *precoding* adaptativo en el dominio de elevación y del acimut, al tiempo que se respetan las características de radiofrecuencia necesarias [11].

Al conformar el *array* en dos dimensiones, el modelado de canal convencional cambia, pues la configuración de las antenas en una sola dimensión lleva a considerar el canal como de 2D, ya que el ángulo de elevación en los posibles caminos de propagación de la señal siempre se considera como cero [11]. No obstante, con el arreglo en 2D es necesario modelar el canal de propagación en tres dimensiones, como se muestra en la Figura 8, donde se tiene en cuenta tanto la dirección en acimut como en elevación.

La conformación de haces verticales convertía a FD-MIMO en la tecnología idónea para su implantación en zonas con alta densidad de edificios de cierta altura, así como entornos con una elevada concentración de usuarios conectados, como aeropuertos, estadios, centros comerciales, recintos para conciertos, etc., en los que la conformación de haces en múltiples direcciones facilitaba el dar servicio a múltiples usuarios al tiempo, colocando los arreglos en 2D en el techo o parte superior de tales emplazamientos y apuntando hacia abajo, llevando al máximo el número de transmisiones MU-MIMO [10].

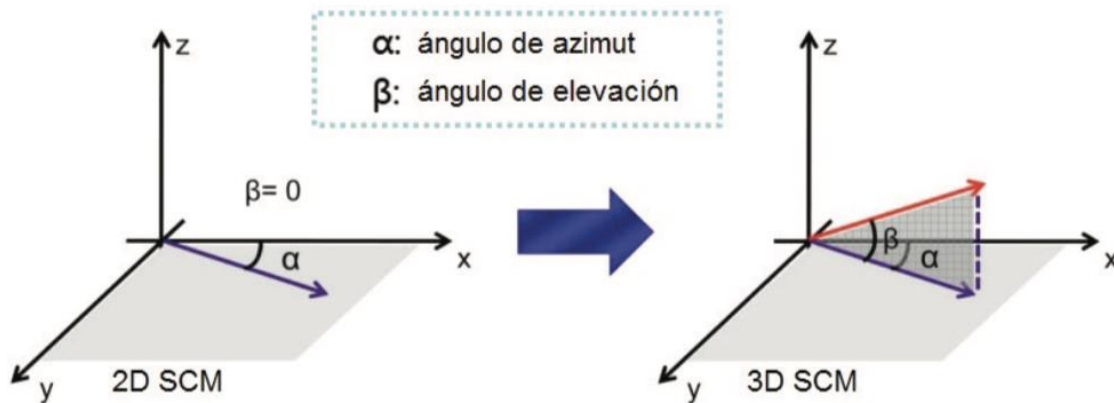


Figura 8: Fundamento de modelado del canal en 3D en comparación con el clásico en 2D [10].

4.3. MIMO Masivo (M-MIMO):

Como resultado de la evolución de todas las tecnologías presentadas hasta el momento surge la conocida como MIMO Masivo (M-MIMO, que en inglés viene de *Massive MIMO*). Si bien la tecnología anterior conseguía establecer *arrays* de con hasta 64 antenas, M-MIMO permite alcanzar la constitución de *arrays* del orden de las centenas. Estas estaciones base dan servicio a un número de usuarios autónomos equipados con una sola antena (para mayor simplicidad) y que en cuantía está alrededor de las pocas decenas. De este modo, M-MIMO trata de aprovechar al máximo múltiples beneficios que otorga la tecnología MU-MIMO, pero esta vez a gran escala, de modo que se pueda evolucionar hacia enlaces más robustos, eficientes y seguros, los cuales harán un uso más adecuado del espectro [12]. Gracias a sus características, esta tecnología es considerada como habilitadora para la próxima generación de comunicaciones, llevando a la sociedad hacia una era más digital, donde además de las personas, los objetos también estarán conectados a través del conocido como el Internet de las Cosas, IoT.

De este modo, la configuración habitual de la tecnología M-MIMO se podría constituir tanto por una red celular con múltiples células como por una célula aislada. Estas se conforman por un *array* de antenas no directivas que ocupan poco espacio. Esta configuración es la que se aprecia en la Figura 9, donde la estación base busca transmitir un flujo de datos diferente para cada usuario, de modo que cada uno de ellos recibe únicamente el que le corresponde sin interferencia de los demás. Todos estos flujos se transmiten de modo que ocupan las mismas frecuencias en el mismo tiempo, algo posible gracias al multiplexado por división espacial que utiliza esta tecnología, debido a la utilización de antenas controladas independientemente. En espacios abiertos, los flujos se transmiten de un modo más dirigido, mientras que en entornos más abarrotados y desordenados, estos pueden llegar por múltiples caminos. En teoría, a mayor número de antenas, mayor y más selectiva es la directividad hacia los usuarios. Así, los flujos se interfieren constructivamente unos a otros en los lugares en los que son esperados, mientras que lo hacen destructivamente allí donde no se les necesita [7].

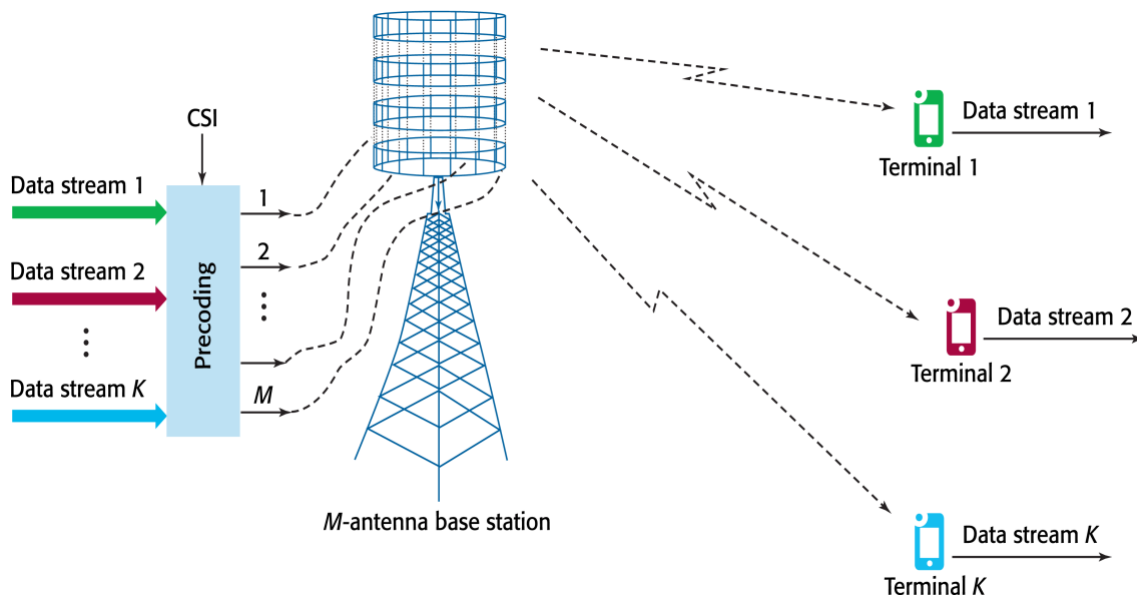


Figura 9: Ejemplo de configuración Down-link para la tecnología M-MIMO [7].

Llevar a cabo este tipo de multiplexación es posible ya que M-MIMO está planteado de modo que utiliza la Duplexación por División de Tiempo (TDD), que se basa en el principio de reciprocidad, el cual permite conocer el estado completo del canal haciendo uso únicamente de la información del Up-link o del Down-link, puesto que en teoría son iguales. Esto permite a la estación base conocer la respuesta en frecuencia del canal que la une con cada uno de los usuarios, combinando la TDD con pilotos en el Up-link, que permiten obtener la información sobre el estado del canal (CSI), la cual se incorpora en el bloque de *precoding* que se ve en la Figura 9, el cual permite mapear los flujos de señal en las señales que transmiten las antenas [7].

Uno de los principios de M-MIMO para poder escalar el número de antenas a tan alto número es que hace las operaciones de multiplexado y demultiplexado utilizando unas características de canal reales obtenidas con resultado de mediciones del canal, en lugar de asumir tales características. Esto posibilita que aumentar el número de antenas siempre suponga obtener un mejor rendimiento, ya que, si se consigue que sea mayor que el número de usuarios activos, supone una mayor selectividad a la hora de transmitir y recibir los flujos de datos, una reducción en la potencia radiada que se suma a la efectividad en el control de potencia y la necesidad de menos energía por bit, para así dar un buen servicio uniformemente por toda la celda sin que el tamaño de estas se vea limitado por el número de terminales, junto con una mayor simplicidad a la hora de hacer el procesamiento de señal y una velocidad efectiva superior. Todo esto es posible ya que se minimizan los efectos del ruido no correlado y del desvanecimiento rápido, pues el sistema deja de tener en consideración el ruido del canal [7], [13].

Otro de los beneficios del elevado número de antenas que utiliza la tecnología MIMO es el ahorro de costes en la elaboración de las estaciones base, pues los componentes que se necesitan utilizan potencias más bajas, lo que permite sustituir los potentes amplificadores de tecnologías anteriores por centenares de amplificadores muchos más sencillos que operan en el rango de los *mWatt*, algo posible gracias a la acción combinada



de estos. También se consigue eliminar los cables coaxiales de más de 4 cm de diámetro que utilizaban anteriores tecnologías junto con otros elementos de gran volumen y coste. El hecho de que las estaciones base de M-MIMO sean más eficientes en términos de la potencia RF radiada total es un avance hacia tecnologías con una menor huella ambiental, haciendo posible incluso que se puedan alimentar mediante energías más limpias como lo son las renovables [12].

La robustez de estos sistemas proviene de la acción combinada del múltiple número de cadenas de RF independientes que lo conforman. Esto hace que problemas como el ruido, el desvanecimiento o fallos en el hardware afecten en bajo promedio a estos sistemas, ya que, si una o unas pocas de las antenas fallan o tienen problemas, la acción combinada de todas las demás hacen del error algo insignificante para el conjunto del sistema. Además, la proporción entre antenas en la estación base y de usuarios hace que haya disponible un elevado número de grados de libertad. Quitando los requeridos para la transmisión de los flujos de datos, el resto se puede utilizar básicamente para cualquier cosa, gracias al espacio vacío de que dispone el canal MIMO, propiedad que permite colocar en dicho espacio casi cualquier cosa sin afectar lo que los receptores perciben. Esta característica hace del M-MIMO una tecnología muy robusta capaz de cancelar las interferencias intencionadas de sistemas de transmisión inalámbricas muy sencillos y que están a disposición del gran público, siendo uno de las mayores amenazas en ciberseguridad existentes, sobre todo en el ámbito de la seguridad pública [12].

Los sistemas de comunicaciones se ven muy afectados por el desvanecimiento, situación que se da cuando señales que se propagan por diferentes caminos se interfieren destructivamente en el receptor, quien tiene que esperar a que el canal cambie lo suficiente para poder recibir la señal correctamente. Los desvanecimientos son una de los mayores problemas a la hora de construir sistemas de comunicaciones de baja latencia, característica fundamental del 5G. M-MIMO se apoya en su elevado número de antenas y en su modo de formación de haces para evitar problemas de desvanecimiento, siendo este uno de los motivos por los que tiene tanto peso en el avance hacia la nueva generación de comunicaciones [12].

En los últimos tiempos el ancho de banda disponible se ha visto muy limitado, lo que ha complicado la transmisión de información a través de múltiples canales de frecuencia. M-MIMO solventa este problema usando OFDM, de modo que cada subportadora dispone de la misma ganancia de canal, permitiendo asignar a cada uno de los terminales todo el ancho de banda disponible, convirtiendo en redundantes la mayoría de las señales de control de la capa física [12].

A pesar de todas estas ventajas, la tecnología M-MIMO también acarrea una serie de inconvenientes que la limitan. El principal es la contaminación de los pilotos, ya que, idealmente, cada uno de los terminales del sistema es asignado con un piloto ortogonal procedente del Up-link. No obstante, el número máximo de secuencias ortogonales de pilotos es finito y está limitado por la duración del intervalo de coherencia dividida por el retardo de propagación del canal. Esto supone que el número máximo de secuencias de pilotos disponibles se agote rápidamente, lo que lleva a tener que reusar algunas de estas secuencias en células diferentes, produciéndose así la mencionada contaminación de pilotos [12]. Lo que supone este fenómeno, atendiendo al caso del Down-link, es que, al efectuar la correlación de la secuencia de pilotos recibida en la estación base con la



secuencia de un determinado terminal, lo que en verdad está obteniendo es una estimación de dicho canal, pero contaminada por una combinación lineal de los canales que la unen con otros terminales de las celdas vecinas, los cuales utilizan la misma secuencia de pilotos, la cual se puede dar incluso cuando dicha correlación es parcial. La estación base, en consecuencia, genera haces de la señal dirigidos hacia todos esos terminales que utilizan la misma secuencia de pilotos, resultando en una interferencia direccional que no se soluciona incrementando el número de antenas en la estación base [9]

Otro problema que se plantea con relación a la estimación de canal y obtención del CSI es la reciprocidad del mismo, un de los principios fundamentales de M-MIMO. Si bien el uso de TDD teóricamente implica la reciprocidad del canal salvo casos en los que la propagación se vea afectada por materiales con propiedades magnéticas extrañas, discordancias al calibrar las cadenas de hardware en las estaciones transmisoras y receptoras puede afectar a dicha reciprocidad. No obstante, este no es un problema tan grave como el anterior, puesto que alcanzar la máxima ganancia de multiplexado no implica la calibración perfecta de dichas cadenas, es más, con que la cadena de la estación base esté calibrada de un modo correcto servirá para transmitir haces coherentes al terminal [12]. Otra solución es la de tomar una de las antenas como referencia y derivar factores de compensación para el resto de antenas en base a la considerada como referente [14].

Un principio más de M-MIMO es el fenómeno de la radiopropagación que se conoce como **propagación favorable** y que implica el hecho de que los canales de propagación que unen a la estación base con cada uno de los usuarios activos son lo suficientemente diferentes entre sí. Más concretamente, apela al hecho de que los diferentes canales que se conforman entre la estación base y los usuarios activos aumentan de ortogonalidad entre ellos al aumentar el número de antenas en la estación base [15]. Usar *arrays* con un bajo número de antenas no compromete la propagación favorable, pero al constituirse *arrays* más grandes, como requiere M-MIMO, este fenómeno se puede ver comprometido si aparecen problemas como pueden ser desvanecimientos a gran escala o alteraciones de las estadísticas de señal a lo largo dicho *array* [12]. No obstante, en el estudio presentado en [12] se demuestra que este es un problema menor para M-MIMO, ya que al incrementarse el número de antenas en la estación base por encima de diez veces el número de usuarios se consiguen unas características que pueden proporcionar un rendimiento más o menos rápido, pero que no se alejan demasiado de los valores teóricos, dando resultados lo suficientemente válidos incluso para condiciones de propagación complicadas.

En definitiva, se comprueba que M-MIMO es una tecnología prometedora, pero que aún tiene mucho camino por recorrer, abriendo muchas puertas a la investigación. Los aspectos principales que quedan por desarrollar van desde la contaminación de pilotos o los problemas que el hardware de bajo costo pueda acarrear, junto con la discordancia en la calibración entre las estaciones transmisora y receptora, hasta la elaboración de un prototipo, pasando por problemas más teóricos como la caracterización de canal, la aparición de nuevos entornos de propagación perjudiciales, el desarrollo de técnicas de procesado de señal más rápidas y efectivas o el estudio de sistemas que implementen arquitecturas de red heterogéneas en sustitución a la clásica configuración de células de más pequeño tamaño [12].



La limitación última es el hecho de que hay un número máximo finito de usuarios a los que se puede dar servicio simultáneamente. Esto se debe a la carga excesiva que puede llegar a suponer la obtención del CSI, y aunque siempre se pueda incrementar el número de antenas en la estación base, llega un momento en la que la mejora de rendimiento deja de ser lineal y se ralentiza, a pesar de que la mejora sea constante para la SINR. Por lo tanto, se ha llegado a la conclusión de que los *arrays* con un elevado número de antenas se han de reservar a terminales fijos o con baja movilidad, donde la teoría dicta que el tiempo para la predicción del canal es ilimitado [7].

4.3.1. Estimación del canal

Uno de los principios del buen rendimiento de M-MIMO es que basa las comunicaciones entre las estaciones emisora y receptora en medidas reales de las respuestas en frecuencia de los canales de propagación. El procedimiento que sigue esta técnica es el de que uno de los extremos transmita señales de entrenamiento conocidas para que, al recibirlas, el otro extremo pueda caracterizar la respuesta en frecuencia. Así, estimados los canales que conforman el enlace, el CSI resultante se utiliza a lo largo de un intervalo de tiempo que dura hasta que el movimiento de los usuarios altera el canal significativamente. Por ello, el tiempo que dura ese intervalo se selecciona de modo que dentro de él ninguno de los usuarios se mueve más de una fracción de la longitud de onda [7].

Los sistemas M-MIMO utilizan TDD con el fin de estimar el canal de un modo más rápido. Como se comentaba al comienzo de la Sección 4.3, la obtención del CSI se basa en el principio de reciprocidad de los sistemas con este tipo de duplexado, de modo que solo es necesario estimar las condiciones del Up-link [9]. Con este fin, se plantea un protocolo [16] por el que los usuarios que hay en la celda en un momento determinado se sincronizan para transmitir señales de datos a través del Up-link, seguidas de las cuales transmiten las secuencias de pilotos, que son utilizadas por la estación base para determinar el CSI, que se utiliza para detectar las señales de datos recibidas previamente, al tiempo que se produce la generación de los haces para la transmisión a través del Down-link. Este proceso, de duración $\tau_u \geq K$, se muestra detallado en la Figura 10.

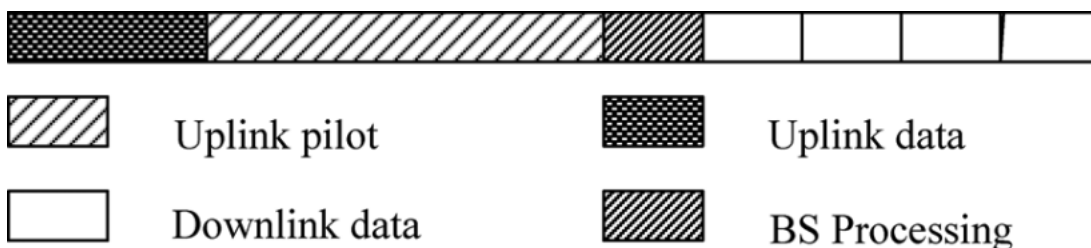


Figura 10: Protocolo TDD para M-MIMO [9].

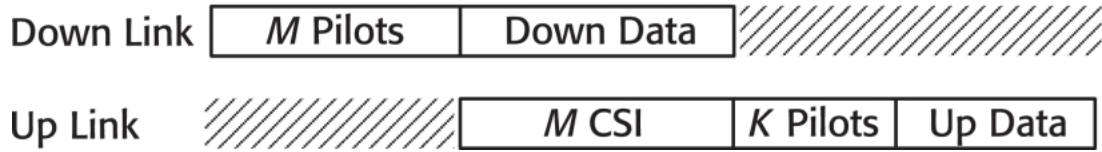


Figura 11: Protocolo FDD para M-MIMO [7].

Por otro lado, si en lugar de TDD se usara FDD, el tiempo requerido para el entrenamiento y obtención del CSI sería muy superior, debido a la pérdida del principio de reciprocidad del canal. En este caso, el procedimiento a seguir, que se muestra en la Figura 11, comenzaría con las M antenas de la estación base transmitiendo pilotos de duración $\tau_d = M$, que tiene que ser reenviados por los K usuarios una vez recibidos por estos, lo que implica invertir de nuevo un tiempo τ_d . A continuación, esos usuarios tienen que transmitir sus secuencias de pilotos, lo que implica que el tiempo de duración de obtención del CSI es de $2\tau_d + \tau_d \geq 2M + K$, muy superior en comparación al del TDD mostrado previamente [7]. Por todos estos motivos es por lo que se ha escogido TDD, ya que, como muestra la Figura 12, es posible escalar las estaciones base M-MIMO sin que se comprometa el número de usuarios activos a los que se da servicio.

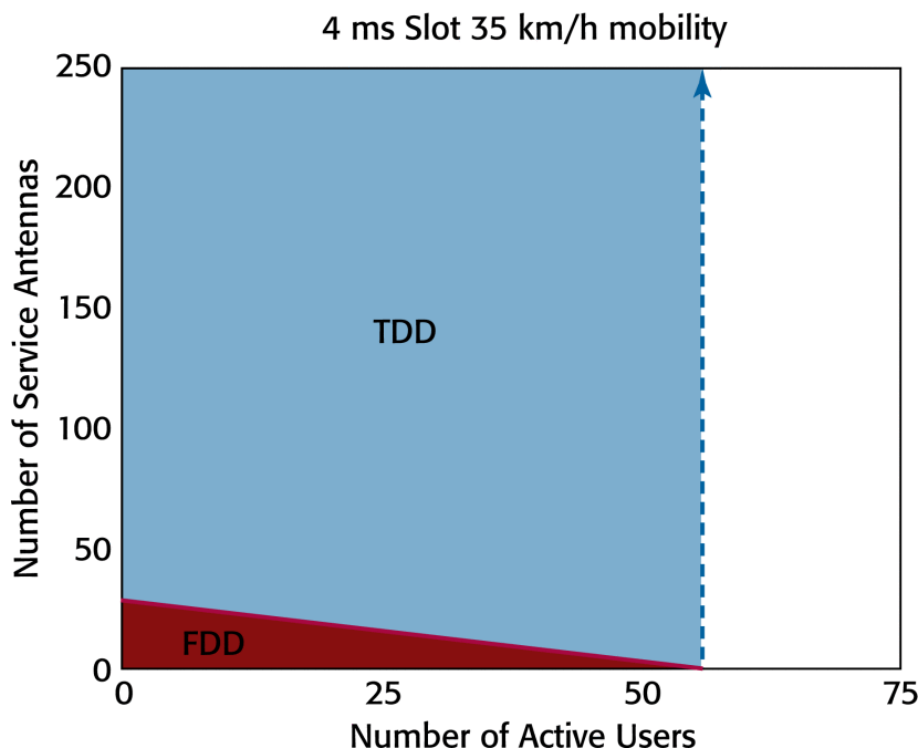


Figura 12: Comparación entre FDD y TDD para M vs K [7].

Gracias al protocolo TDD, M-MIMO puede establecer la comunicación en base a información sobre el estado del canal que es medida directamente en lugar de estimada, una de las características que garantizan la escalabilidad de la tecnología, pues así cada antena que se añade ayudará a mejorar el rendimiento del enlace, algo imposible si se utilizasen estimaciones de la respuesta canal [7].



4.3.2. Control de potencia

En M-MIMO, tanto para el Up-link como para el Down-link, el control de potencia se lleva a cabo multiplicando los K símbolos QAM por el coeficiente que se muestra a continuación,

$$\sqrt{\eta_k} q_k, \quad \forall k = 1, \dots, K, \quad \sum_{k=1}^K \eta_k \leq 1 \quad (3)$$

donde q_k representa los cada uno de los K símbolos QAM, y η_k es el término para representar el control de la potencia [7].

Una de las propiedades de M-MIMO es que la ganancia de formación del haz crece linealmente al aumentar el número de antenas, e independientemente con respecto a la frecuencia, manteniéndose constante con respecto a esta, lo que, a su vez, convierte a los coeficientes de control de potencia η_k independientes con respecto de la misma. En las expresiones para la SINR de las señales, antes y después de ser codificadas, estos coeficientes se tienen en cuenta, y dadas sus características, las limitaciones matemáticas que afectan a la SINR lo hacen del mismo modo a η_k . De este modo, el método más usado para el control de potencia, en inglés conocido como *max-min power control*, que proporciona un rendimiento constante a todos los usuarios de la celda y se obtiene resolviendo un sistema lineal de ecuaciones [7].

No obstante, existen otros algoritmos para el control de la potencia que buscan mejorar el rendimiento de todos los usuarios aprovechando el hecho de que en M-MIMO el estado del enlace es conocido y haciendo un reparto distribuido de la potencia disponible en base a la SNR de cada canal.

4.3.3. Codificación y decodificación lineal

Para el Up-link, el método más sencillo de decodificado de las señales recibidas es el de aplicar un filtro conjugado a la entrada del receptor, como se muestra en la Figura 13. Basado en el conocimiento del respuesta en frecuencia del canal, representada como g_{mk} , cada usuario transmite uno de los q_k símbolos QAM, que se recuperan en el receptor multiplicándolos por el complejo conjugado de la respuesta en frecuencia correspondiente, en base al coeficiente m , sumándose todos los que correspondan al mismo m a la salida del filtro conjugado para así recuperar cada uno de los k símbolos transmitidos por los K usuarios [7].

Por su parte, en el Down-link se utiliza un codificado que sigue un procedimiento bastante similar, pero en sentido inverso, basada en conjugar los haces directivos que se forman. Cada uno de los q_k símbolos QAM se multiplican por el complejo conjugado de la respuesta en frecuencia g_{mk} del canal que les une con cada uno de los K usuarios, de modo que a cada uno de ellos les llega únicamente y en fase los componentes de las M señales transmitidas que corresponden a cada uno de los K usuarios [7], como representa la Figura 14.

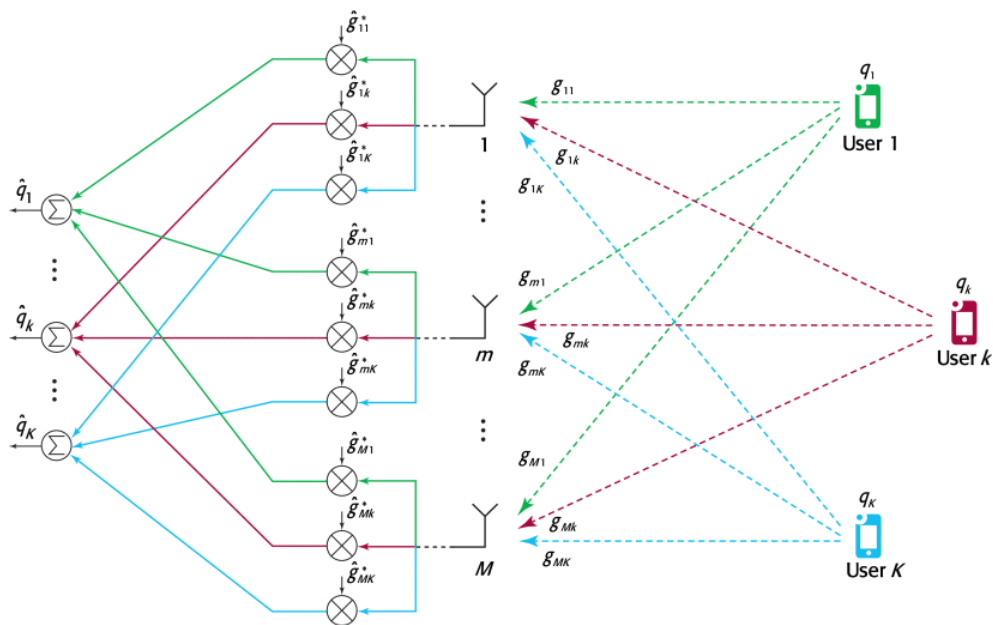


Figura 13: Diagrama del Up-link para representar la decodificación por filtros conjugados [7].

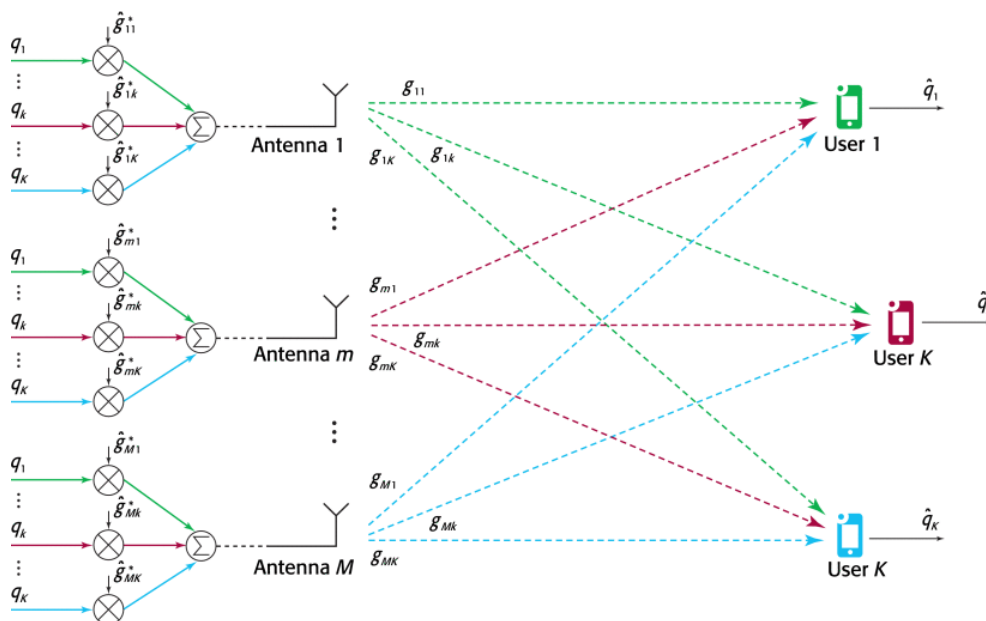


Figura 14: Diagrama del Down-link para mostrar la codificación por haces conjugados [7].

En resumen, siguiendo estas técnicas el codificado lineal se basa en multiplicar el vector de señales transmitidas, de longitud M , por una matriz de dimensiones $M \times K$, mientras que la decodificación lineal se basa en multiplicar el vector de señales transmitidas, de longitud K , por una matriz de dimensiones $K \times M$, conformándose ambas matrices por los complejos conjugados de las medidas de las respuestas en frecuencia del canal.

La ventaja que hace de estas técnicas las prevalencias para M-MIMO es el hecho de que el procesamiento de señal se hace localmente en cada una de las antenas, lo que permite una arquitectura descentralizada resistente a fallos que puedan tener algunas de las



antenas, pues al no depender las unas de las otras, las operativas restantes pueden seguir funcionando, pues van a seguir haciendo lo que siempre hacen. Además, durante períodos de baja demanda, algunas antenas se pueden llevar al reposo para así hacer el sistema más eficiente desde un punto de vista energético sin comprometer el rendimiento de las antenas que quedan operativas [7].



5. Caracterización de canales M-MIMO



5.1. Introducción

Tras presentar la tecnología M-MIMO y comentar sus principios, ventajas y limitaciones, el paso siguiente es el de analizar su comportamiento. Para ello, es necesario presentar los parámetros que se van a utilizar para llevar a cabo la caracterización del canal M-MIMO desde un punto de vista analítico en base a los resultados recogidos en las campañas de medidas llevadas a cabo por el grupo GISAR. Existen múltiples aspectos que se pueden utilizar para caracterizar el canal, entre los cuales despierta gran interés el de la **propagación favorable** que se mencionaba en secciones anteriores. Aunque haya diferentes parámetros que se pueden utilizar para medir el grado de ortogonalidad entre los canales, el más habitual a la hora de caracterizar el canal con respecto a la máxima eficiencia espectral alcanzable es hacer el cálculo de la capacidad de dicho canal [15].

Para poder caracterizar el canal de un modo completo es necesario estudiar por separado la capacidad del Up-link y del Down-link, ya que las características de los enlaces son diferentes. Aunque se hayan hecho menciones a esta condición de M-MIMO en anteriores secciones, antes de comenzar a introducir los parámetros a estudiar es necesaria hacer una distinción entre M-MIMO *Multiple Access Channel* (Up-link) y *Broadcast* (Down-link).

5.1.1. Up-link o M-MIMO MAC (Multiple Access Channel):

Hace referencia al enlace ascendente, como el que se presenta en la Figura 15, siendo este el que se establece entre la estación base y los usuarios presentes en una celda, pero en el cual son estos últimos los que le transmiten información a la primera. El número máximo de usuarios en la nomenclatura usada es K , de modo que el número de antenas en la estación base, M , es mayor que K ($M > K$). Al haber únicamente un receptor, el número de componentes de ruido del canal se reduce a uno.

Cada uno de los usuarios transmite con una potencia p , que en el modelo estudiado es igual para los K usuarios, de modo que ninguno de ellos puede transmitir a mayor potencia de la asignada, lo que limita también la tasa de datos máxima a la que pueden transmitir. Por lo tanto, la potencia total transmitida es

$$P = pK \quad (4)$$

La utilización de TDD permite la obtención del CSI en este enlace para la constitución de la matriz \mathbf{H} que será descrita en la siguiente Sección. Todo ello se consigue mediante el uso de pilotos siguiendo el esquema que se presentaba en la Figura 10. Como se describe en la Sección 4.3.3, el procesado de la señal, el cual se hace en la estación base, consiste en aplicación de filtros conjugados, tras los cuales se combinan las señales que salen de los mismos para obtener las K señales diferentes.

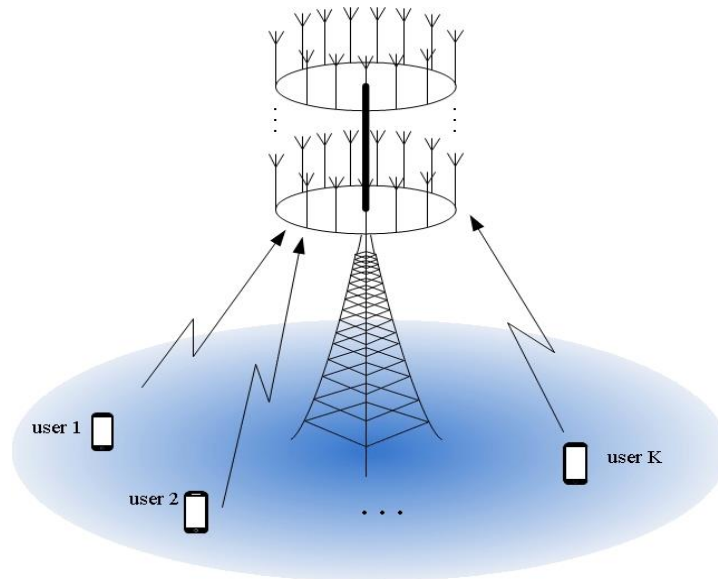


Figura 15: Representación gráfica de M-MIMO MAC [22].

5.1.2. Down-link o M-MIMO BC (Broadcast):

Hace referencia al enlace descendente, que aparece representado en la Figura 16, el que se establece entre la estación base y los K usuarios activos presentes en la celda, de modo que de nuevo $M > K$, y en el que, a diferencia del anterior, es la estación base quien transmite la información a los usuarios, con el codificado por formación de haces presentado en la Sección 4.3.3, siendo los usuarios los encargados de decodificar y combinar la información presente en cada haz, una tarea delicada que aumenta la complejidad de los terminales de recepción de los usuarios de la celda.

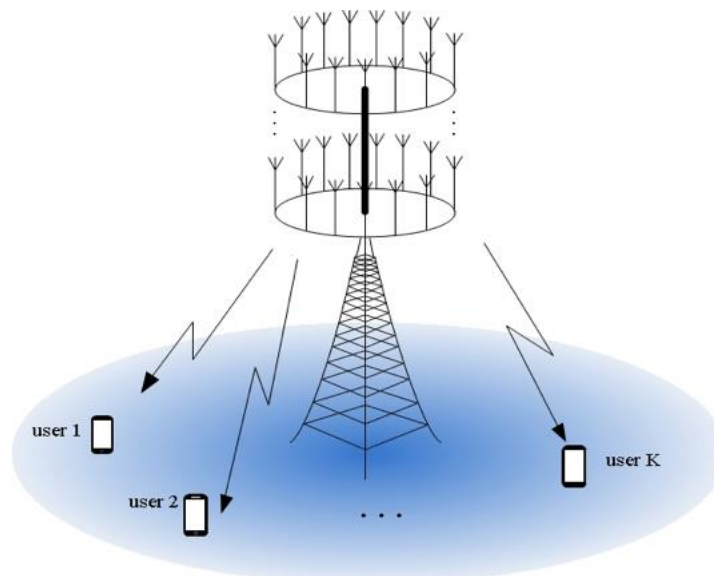


Figura 16: Representación gráfica de M-MIMO BC [22].

Este canal se presenta más complejo que el anterior, pues cada usuario introduce una componente de ruido. Por otro lado, la matriz de canal \mathbf{H} utilizada es la establecida en el Up-link en el esquema TDD. La potencia de transmisión de la estación base es fija y se



mantiene constante a lo largo de la transmisión, repartiéndose equitativamente entre cada uno de los usuarios activos en la celda.

5.2. Matriz \mathbf{H} de canal

Considerando el modelo presentado hasta ahora, la señal recibida para la subportadora i -ésima cuando los K usuarios están activos sigue la expresión, para el ejemplo del Up-link

$$y_m(i) = \mathbf{H}(i) \cdot s_k(i) + n_m(i), \quad \forall i = 1, 2, \dots, N_f \quad (5)$$

donde $y_m(i)$ es el vector columna de longitud M que conforma la señal recibida para la subportadora i -ésima, siendo $s_k(i)$ otro vector columna, en este caso de longitud K , que representa la señal transmitida para dicha subportadora. Por su parte, $n_m(i)$ es un vector columna complejo que denota la componente de ruido, formado por M componentes Gaussianas i.i.d. y de varianza unidad. Finalmente se encuentra la matriz de canal para la subportadora en cuestión, $\mathbf{H}(i)$, de dimensiones $M \times K$, donde cada una de las columnas representa el k -ésimo canal de banda estrecha $\mathbf{h}_{mk}(i)$, para cada una de las subportadoras i -ésima [15]. De un modo más completo, la expresión (5) resultaría

$$\begin{bmatrix} y_1(i) \\ \vdots \\ y_M(i) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{h}_{11}(i) & \cdots & \mathbf{h}_{1K}(i) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{h}_{M1}(i) & \cdots & \mathbf{h}_{MK}(i) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} s_1(i) \\ \vdots \\ s_K(i) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1(i) \\ \vdots \\ n_M(i) \end{bmatrix} \quad (6)$$

Así, la matriz \mathbf{H} representa el efecto del canal cuando se transmite mediante la subportadora i -ésima entre la antena m y la k . Las expresiones (5) y (6) son modificables para su aplicación al Down-link, puesto que gracias al uso de TDD y su condición de reciprocidad, la matriz de canal \mathbf{H} es la misma para el Up-link y para el Down-link.

5.3. Capacidad del canal

La capacidad de un canal se entiende como la máxima tasa de transmisión de datos que el canal puede soportar sin presencia de errores. En otras palabras, la cantidad de información que puede enviar el transmisor a través del canal manteniendo la probabilidad de error nula.

En M-MIMO, cuando se usa junto con un esquema TDD, aunque el canal sea considerado recíproco tanto para el Up-link como para el Down-link la capacidad no es la misma para ambos, por lo que cabe hacer una distinción entre las formas de calcular ambas. El objetivo de parte de este trabajo reside en encontrar la forma de que tales capacidades se igualen, como se Sección 5.3.2.



5.3.1. Capacidad del canal Up-link

El hecho de que esta sea la configuración más habitual de canal para el estudio de las capacidades M-MIMO hace que la mayoría de los estudios se centren en ella para el cálculo de la capacidad. Una de las formas de calcular tal valor es el presentado por [15], donde se parte de la fórmula presentada en (1), y suponiendo un conocimiento perfecto del canal en la estación base, se obtiene el valor acumulativo de la capacidad haciendo una descomposición de la matriz de canal en valores singulares de modo que

$$C(i) = \sum_{k=1}^K \log_2 \left(1 + \frac{SNR}{K} \cdot \lambda_k \right), \quad \forall i = 1, 2, \dots, N_f \quad (7)$$

donde λ_k es el k -ésimo autovalor de la matriz $\mathbf{H}^H \mathbf{H}$, o lo que es lo mismo, el cuadrado del valor singular k -ésimo de la matriz \mathbf{H} .

De este modo, el valor asintótico del Up-link para condiciones de propagación favorable es el siguiente

$$C = K \cdot \log_2 \left(1 + \frac{M \cdot SNR}{K} \right) \quad (8)$$

lo que hace ver que si las condiciones de propagación favorable se cumplen la capacidad asintótica mejorará a medida que se aumenta el número de antenas en la estación base con respecto al número de usuarios activos.

Por otro lado, [8] propone otro camino para calcular dicho valor de la capacidad haciendo uso de la matriz de canal completa, en lugar de desglosarla en valores singulares. En su caso, hace uso del producto $\mathbf{H}\mathbf{H}^H$, de modo que

$$C = \log_2 \det \left(I_M + \frac{SNR}{K} \cdot \mathbf{H}\mathbf{H}^H \right) \quad (9)$$

donde I_M es la matriz identidad de dimensiones $M \times M$. En su estudio, Hoffman alcanza el mismo valor asintótico para la capacidad del Up-link que el presentado en (8).

5.3.2. Capacidad del canal Down-link

El objetivo de este trabajo es el de tomar las ecuaciones presentadas en la Sección anterior y adaptarlas al canal descendente. Las dos fórmulas presentadas son adaptables al Down-link de modo que

$$C(i) = \sum_{k=1}^M \log_2 \left(1 + \frac{SNR}{M} \cdot \lambda_k \right), \quad \forall i = 1, 2, \dots, N_f \quad (10)$$



$$C = \log_2 \det \left(I_K + \frac{SNR}{M} \cdot H^H H \right) \quad (11)$$

Estas ecuaciones resultan en unos valores muy inferiores a los del Up-link, puesto que en ambos casos el valor de la SNR se divide por el número de antenas que se consideran como transmisoras. Puesto que $M > K$, en el Down-link, el cociente de esta división será mucho menor, por lo que necesita ser escalado para que las capacidades de ambas configuraciones se igualen.

El valor de la SNR que se introduce en estas ecuaciones básicamente representa la potencia del transmisor, ya que el vector que contiene la información transmitida, $s_k(i)$ en (5) por ejemplo, está normalizado de modo que $\mathbb{E}\{\|s_k\|^2\} = 1$, a la par que el ruido es Gaussiano y los elementos del vector ruido están i.i.d. con varianza unidad. Por ello, concretamente en estas ecuaciones SNR realmente hace referencia a la potencia con la que los datos salen de la estación transmisora.

Por ello, para que las capacidades se igualen, es necesario escalar el valor de la potencia transmitida, o lo que es lo mismo, del valor SNR que aparece en (10) y (11). Con este fin, es necesario comprender detenidamente el reparto de potencia que hace la estación base entre las antenas transmisoras. Si se tienen M antenas transmitiendo en la estación base a los K usuarios activos al tiempo, para mantener el valor de la SNR del Up-link es necesario que cada una de las M antenas transmisoras hagan un reparto equivalente de la potencia con la que se transmite en el Up-link entre los K usuarios activos, de modo que

$$\rho = \frac{M \cdot SNR}{K} \quad (12)$$

donde ρ representa el valor escalado de la SNR, o lo que es lo mismo, la potencia de transmisión de la estación base, para las ecuaciones del Down-link, que quedarían tal que

$$C(i) = \sum_{k=1}^M \log_2 \left(1 + \frac{\rho}{M} \cdot \lambda_k \right), \quad \forall i = 1, 2, \dots, N_f \quad (13)$$

$$C = \log_2 \det \left(I_K + \frac{\rho}{M} \cdot H^H H \right) \quad (14)$$

El valor asintótico que se obtiene es presentado por [17], de modo que, para unas condiciones de propagación favorable,

$$C = K \cdot \log_2(1 + \rho) = K \cdot \log_2 \left(1 + \frac{M \cdot SNR}{K} \right) \quad (15)$$

igualando finalmente el valor presentado por [15] en (8), lo que supone que se igualen las capacidades tanto en el Up-link como en el Down-link.



5.4. Eficiencia espectral

Este parámetro del enlace se utiliza para medir el rendimiento del método seleccionado para codificar el canal, siendo este el método elegido para transmitir sin errores una cantidad de información. Así, la eficiencia espectral mide la eficiencia de dicho método, siendo un parámetro que se ve limitado por la capacidad del canal. Sobre el papel, se define como el número de bits por unidad de tiempo que se pueden transmitir por unidad de ancho de banda (bits por segundo por Hercio, bits/s/Hz) [18], siendo la capacidad del canal, tal y como se define en la Sección 5.3, el valor máximo obtenible para la eficiencia espectral en un canal determinado, que dependerá del procesado de señal que sea utilizado.

Partiendo de (5) y siguiendo el camino planteado por [19], el desarrollo teórico para alcanzar la fórmula que permita calcular la eficiencia espectral en el Up-link pasa por la detección del usuario k -ésimo, que se fundamenta en la matriz \mathbf{H} del canal, de dimensiones $(M \times K)$. Cada una de las columnas de \mathbf{H} representa la respuesta del canal para cada uno de los K usuarios, \mathbf{h}_k , de dimensiones $(M \times 1)$. Asimismo, el desarrollo para el cálculo de la eficiencia espectral también se basa en la matriz \mathbf{V} de la combinación en el receptor, cuyas dimensiones también son $(M \times K)$. Las columnas de esta matriz, \mathbf{v}_k , representan el vector columna de combinación para cada uno de los usuarios k -ésimo. La matriz \mathbf{V} depende de \mathbf{H} para así poder recombinar de un modo coherente cada uno de los componentes deseados de la señal recibida en cada una de las M antenas de la estación base [19].

Mientras dura la transmisión de datos, la estación base multiplica la señal recibida y , con el vector de combinación para así poder alcanzar la detección del usuario k -ésimo de modo que

$$\mathbf{v}_k^H y = \mathbf{v}_k^H \mathbf{h}_k s_k + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^K \mathbf{v}_k^H \mathbf{h}_i s_i + \mathbf{v}_k^H n \quad (16)$$

donde el primer sumando representa la señal deseada de acuerdo con el canal estimado para el usuario k -ésimo; el segundo es un sumatorio que acumula la interferencia que el resto de los usuarios i -ésimos activos puedan causar; por su parte, el último sumando representa la interferencia que pueda causar el ruido.

A partir de dicha combinación se puede obtener la relación señal-interferencia más ruido, $SINR$, para un determinado usuario k -ésimo

$$SINR_k = \frac{|\mathbf{v}_k^H \mathbf{h}_k|^2}{\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^K \mathbf{v}_k^H \mathbf{h}_i s_i + \frac{\mathbf{v}_k}{snr_k}} \quad (17)$$

Con snr_k representando la división de la relación señal a ruido para cada uno de los usuarios k -ésimo entre el número de usuarios activos totales.



Finalmente, la fórmula que se alcanza para calcular la eficiencia espectral para uno de los usuarios activos a cada una de las frecuencias f_q es

$$SE_k(f_q) = \log_2 \left(1 + SINR_k(f_q) \right) \quad (18)$$

Que tiene un valor acumulado para el conjunto de los K usuarios activos que depende en función de las frecuencias f_q de modo que

$$SE(f_q) = \sum_{i=1}^K SE_i(f_q) \quad (19)$$



6. Resultados

6.1. Introducción

Tras presentar los principios teóricos de la tecnología objeto de este trabajo, MU-MIMO, así como las propiedades que han sido analizadas con el fin de caracterizarla, a lo largo de esta sección se van a presentar los resultados obtenidos de dicho trabajo de caracterización. En primer lugar, se va a presentar los resultados obtenidos para el estudio de la capacidad del enlace MU-MIMO, y más en particular, se va a desarrollar el cómo se ha logrado equiparar las capacidades del Down-link con las del Up-link. Además, se va a presentar un estudio de la eficiencia espectral con el que se pretende caracterizar dos enlaces Up-link bajo diferentes situaciones de línea de visión y directividad de las antenas usadas en la estación base, así como la influencia de la normalización empleada en la misma.

6.2. Software

Todos los resultados que se van a presentar en las dos siguientes secciones han sido obtenidos mediante la herramienta de programación MATLAB, haciendo uso de una de las aplicaciones desarrolladas por el grupo de investigación GISAR, a la que se accede pulsando el botón *Capacity* de la interfaz principal, la cual se muestra en la Figura 17.

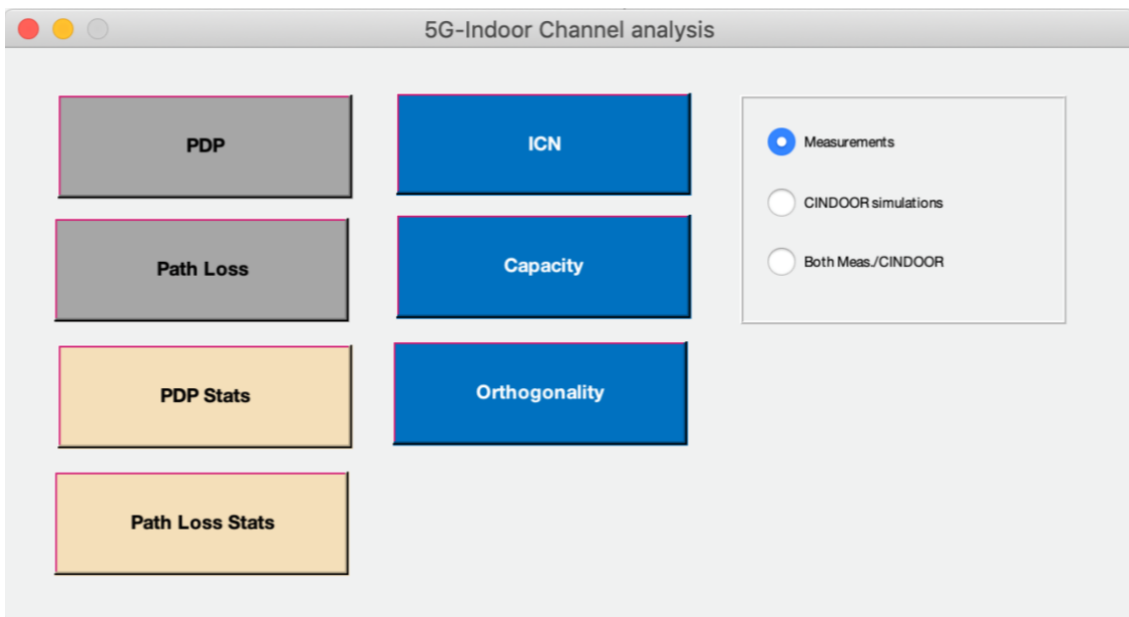


Figura 17: Interfaz principal del software desarrollado por el GISAR.

Una vez pulsado ese botón, se accede a la aplicación, la cual se muestra en la Figura 18, y cuyo uso se basa en cargar los ficheros con los datos de las medidas obtenidas en las diferentes campañas llevadas a cabo por el mismo grupo, las cuales se explicarán con un mayor detenimiento en las siguientes secciones, tantos ficheros como usuarios activos a los que da servicio la estación base como se hayan indicado en el recuadro del centro, que va desde 2 a 20 (el hecho de que el título del recuadro sea número de transmisores es debido a que la aplicación se ha programado para simulaciones del Up-link). Una vez finalizada la carga de los ficheros, se le indica a la aplicación el tipo de normalización a

usar, siendo *User normalization* aquella que implica control de la potencia, y *Global normalization* la que no lo implica; así como el valor de la SNR global. Una vez marcados los parámetros, se pasa a la obtención de las gráficas que se van a presentar en las siguientes secciones con los botones situados a la izquierda, que devuelven gráficas para el valor de la capacidad en función del valor de la SNR, en función del número de antenas en la estación base y las CDFs de la capacidad y de la eficiencia espectral, respectivamente.

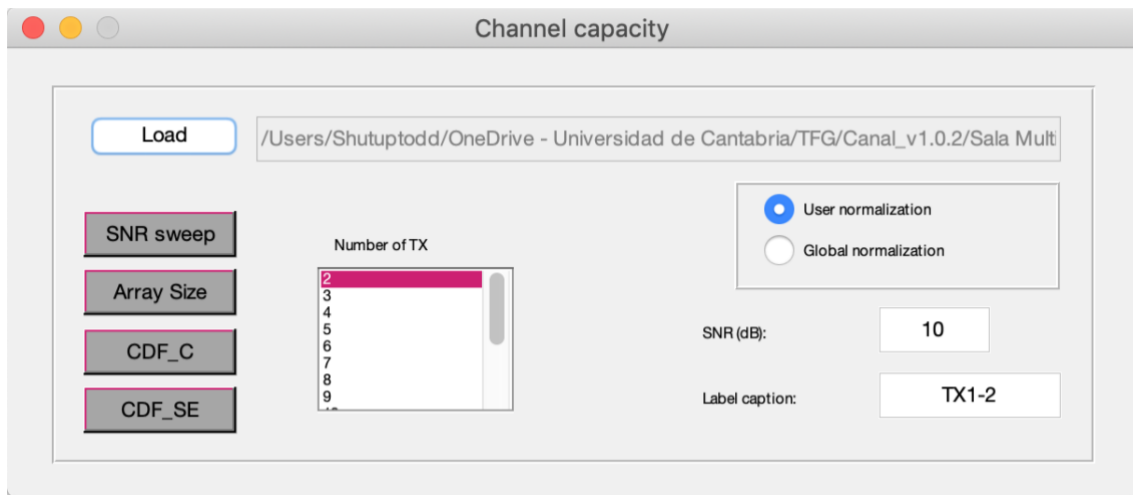


Figura 18: Interfaz de la aplicación "Capacity".

6.3. Sistema de medida

El sistema utilizado para llevar a cabo las dos campañas de medidas que se utilizan para hacer las simulaciones de las Secciones 0 y 0 tiene como finalidad el de sondear el canal para poder obtener así, en el dominio de la frecuencia, el parámetro de dispersión S_{21} , que se corresponde con la función de transferencia de canal compleja (CTF por sus siglas en inglés, *Complex Channel Transfer Function*) o matriz \mathbf{H} del canal [20], [21], para así poder simular el canal M-MIMO en interior que se veía en la Fórmula (5) y que se repite en (21):

$$y_m(i) = \mathbf{H}(i) \cdot s_k(i) + n_m(i) \quad \forall i = 1, 2, \dots, N_f \quad (20)$$

El sistema, que se presenta simplificado en la Figura 19, está compuesto por un escáner plano y un analizador de redes (VNA por sus siglas en inglés, *Vector Network Analyzer*), modelo E8362A de la compañía *Keysight Technologies*.

El escáner plano está conformado por dos unidades lineales y dos servomotores asociados que funcionan mediante las indicaciones del controlador de posición, que está conectado al ordenador a través del puerto serie, con el fin de emular una matriz virtual en el lado de la estación base. Así, en cada uno de los puntos de la matriz virtual, se adquiere el parámetro S_{21} , que, por definición, es la CTF de cada una de las posiciones, adquiriéndose así la caracterización completa del canal entre la estación base y cada uno de los usuarios activos [20], [21].

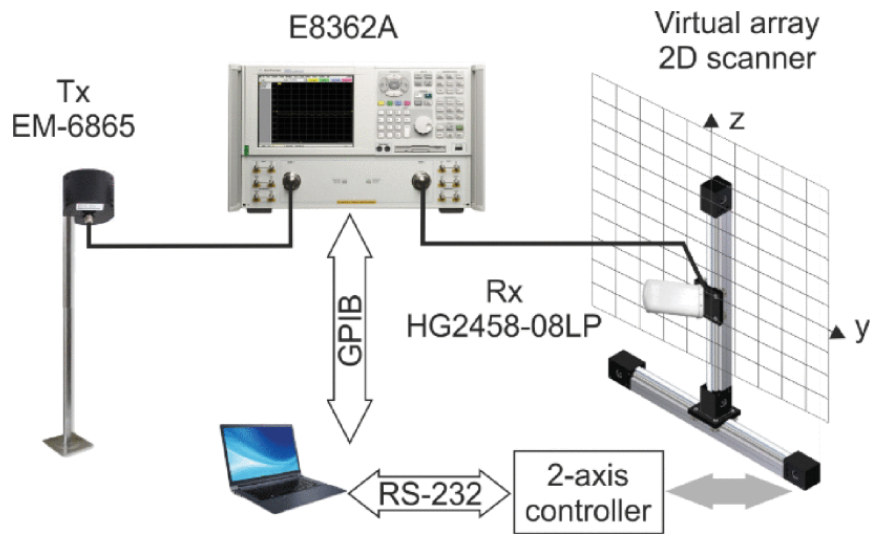


Figura 19: Esquema del sistema constituido por el GISAR para las dos campañas de medidas [20], [21].

En lo respectivo a las antenas, en el lado del usuario activo se ha utilizado la misma antena para las dos campañas de medida, una antena omnidireccional bicónica, modelo EM-6865 de Electrometrics, la cual funciona en el rango de 2 a 18 GHz. En el lado de la estación base, hay que hacer una distinción entre las dos campañas:

- En la campaña de la Sección 6.4, se ha utilizado una antena directiva del tipo log-periódica, más concretamente el modelo HG2458-08LP de L-Com, que opera en el rango de 2.3 a 6.5 GHz. Esta se ha ido colocando de modo que se ha conformado una matriz virtual de 10x10 con una separación en todas direcciones de 50 mm entre puntos (0.53λ a 3.2 GHz) [20].
- En la campaña de la Sección 0 se han utilizado dos antenas diferentes en el lado de la estación base: una directiva, la misma que se utiliza en la otra campaña (la de tipo log-periódica HG2458-08LP de L-Com) y otra omnidireccional, la misma que en el lado del usuario activo (la bicónica EM-6865 de Electrometrics), con el fin de comparar el rendimiento de ambas. La matriz virtual resultante de esta campaña es de 7x7 con una separación de 21.6 mm entre puntos ($\lambda/4$ a 3.5 GHz) [21].

Las medidas se han llevado a cabo en la banda de frecuencia de interés que va desde los 3 a los 4 GHz. En este ancho de banda de 1 GHz se han medido $N_f = 801$ tonos de frecuencia, espaciados uniformemente $\Delta f = 1.25$ MHz. Esta resolución se corresponde con un tiempo retardo máximo y sin *aliasing* de $1/\Delta f = 800$ ns, lo que permite una máxima distancia observable de $c_0/\Delta f = 240$ metros, siendo c_0 la velocidad de la luz en el vacío, una distancia mayor que la de los escenarios de cada una de las campañas y que permite garantizar que las condiciones de multicamino se miden adecuadamente [20]. Cabe mencionar que, para las simulaciones, el rango utilizado se ha reducido de entre 3 y 4 GHz a uno menor que va de los 3.2 a los 4 GHz, resultando así en $N_f = 641$ tonos de frecuencia.

6.4. Capacidad del enlace

El objetivo final del estudio de la capacidad es el de conseguir que los valores de este parámetro se equiparen en el Down-link a los del Up-link, puesto que se espera sean mucho menores, como se expone en la Sección 5.3.2. Para ello, se va a hacer un estudio analítico basado en los datos obtenidos en la campaña de medidas llevada a cabo por el GISAR en el entorno que se presenta a en la Sección 6.4.1.

El estudio de la capacidad, tanto para el Up-link como para el Down-link, se basa en la obtención de este parámetro del canal de tres formas diferentes. La primera va a ser realizando un barrido con respecto al número de antenas que conforman el array de la estación base, para así poder estudiar cómo va evolucionando la capacidad del enlace a medida que aumenta este valor. La segunda manera será estudiar cómo cambia la capacidad del enlace al realizar el barrido sobre el valor de la SNR global. Finalmente, se va a representar la función de distribución acumulativa (CDF) para la capacidad. En todos los casos se va a incluir en las gráficas la curva teórica correspondiente al canal i.i.d. de Rayleigh a modo de referencia.

Cabe destacar que todas las gráficas que se presentan en esta sección han sido resultado de la simulación para 16 usuarios activos, los que van del 1 al 16 en la Figura 20, con una SNR de 10 dB para todo el enlace y un array de 100 antenas en la estación base. La razón de escoger 16 usuarios en lugar de los 20 se debe a un motivo de ahorro computacional, puesto que es un número de usuarios activos lo suficientemente grande como para extraer conclusiones, ahorrando tiempo en la ejecución.

6.4.1. Entorno de medida

La sala en la que la campaña donde las medidas que se utilizan en esta sección se muestra en la Figura 20. Se trata de una sala de conferencias del “Edificio de Ingeniería de Telecomunicación Profesor José Luis García García” de la Universidad de Cantabria, cuya estructura es de hormigón armado, con el techo panelado, paredes de yeso y puertas metálicas. Además, todo el mobiliario es de madera.

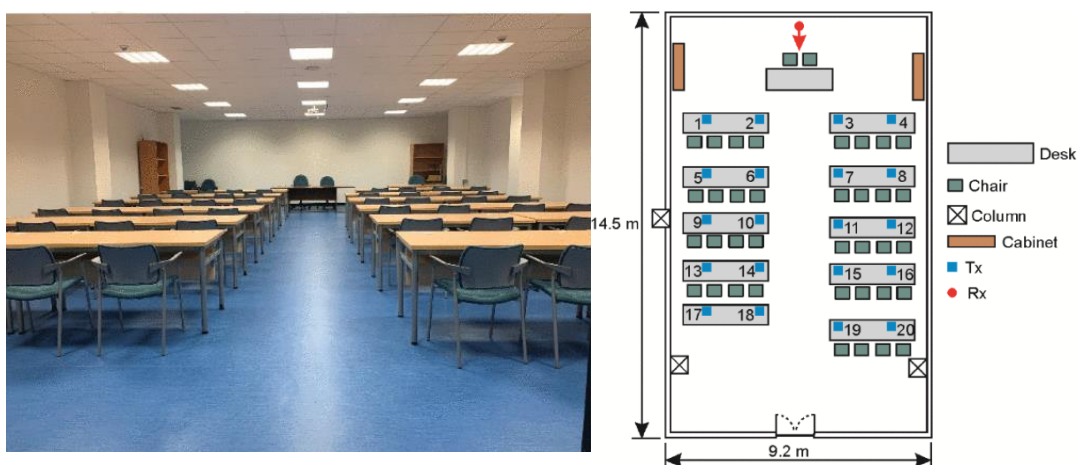


Figura 20: Sala de conferencias en la que se ha llevado a cabo la sesión de medidas junto con el plano de la misma, incluyendo la distribución de los usuarios activos [20].



6.4.2. Capacidad del Up-link

En esta sección se presentan las gráficas que muestran el comportamiento de la capacidad en función de los parámetros presentados en la introducción a la Sección 6.4, haciendo los barridos sobre las Fórmulas (7) y (9).

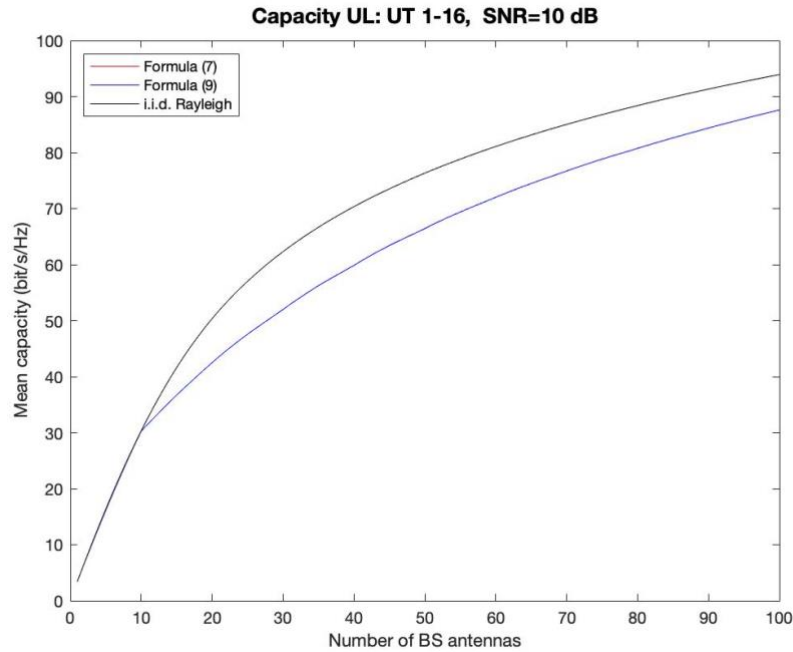


Figura 21: Capacidad del Up-link en función del número de antenas del array en la estación base.

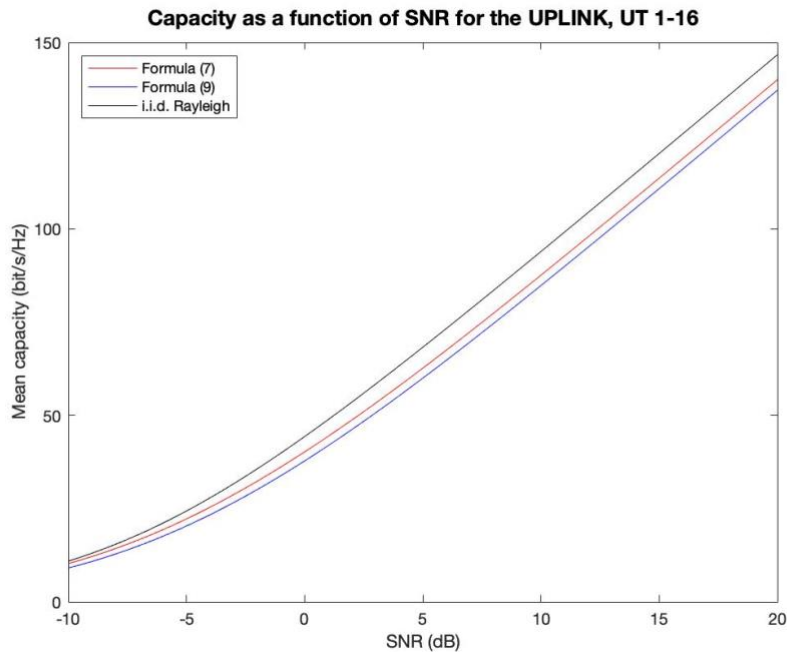


Figura 22: Capacidad del Up-link en función de la SNR del enlace.

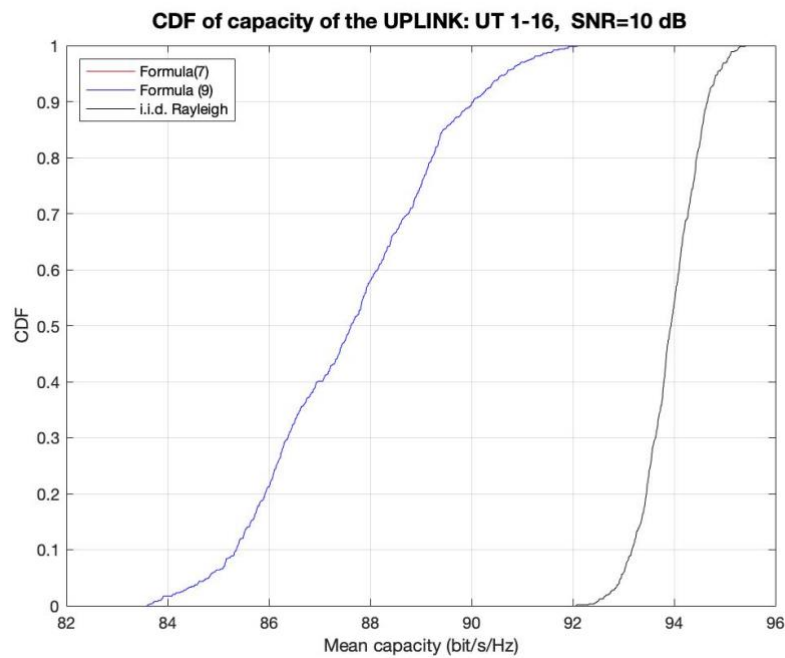


Figura 23: CDF de la capacidad para el UP-link.

De entre todas las gráficas, llama la atención como, para el barrido sobre la SNR, el resultado obtenido para la capacidad difiere levemente en función de la fórmula usada, mientras que para las otras dos gráficas ambos resultados se superponen. Esto se debe a que, con la Fórmula (7) se utilizan los autovalores de la matriz de canal, mientras que con la (9) se utiliza la matriz entera, lo que puede acarrear un error numérico como el que se aprecia en la Figura 22.

6.4.3. Capacidad del Down-link

En esta sección se van a presentar las mismas gráficas que se presentan en la anterior, salvo que ahora se van a reproducir para el Down-link, haciendo para ellos uso de las Fórmulas (10) y (11). El objetivo principal de esta representación es el de mostrar como, efectivamente, la capacidad de este canal dista mucho de la del Up-link, incluso para la curva de la i.i.d. de Rayleigh.

Como se puede apreciar en los resultados de las Figura 24 a la Figura 26, los valores a priori de la capacidad para el Down-link son efectivamente bastante inferiores a los del Up-link, como se esperaba en base a lo comentado en la Sección 5.3.2, ya que al dividir entre el número de antenas transmisoras, un número muy superior al de usuarios activos, el valor de la capacidad se reduce considerablemente. Es por ello que ese parámetro necesita ser escalado calculando el parámetro ρ que se obtiene de aplicar la Fórmula (12), y hacer el cálculo de la capacidad con las Fórmulas (13) y (14), como se va a mostrar en la siguiente sección.

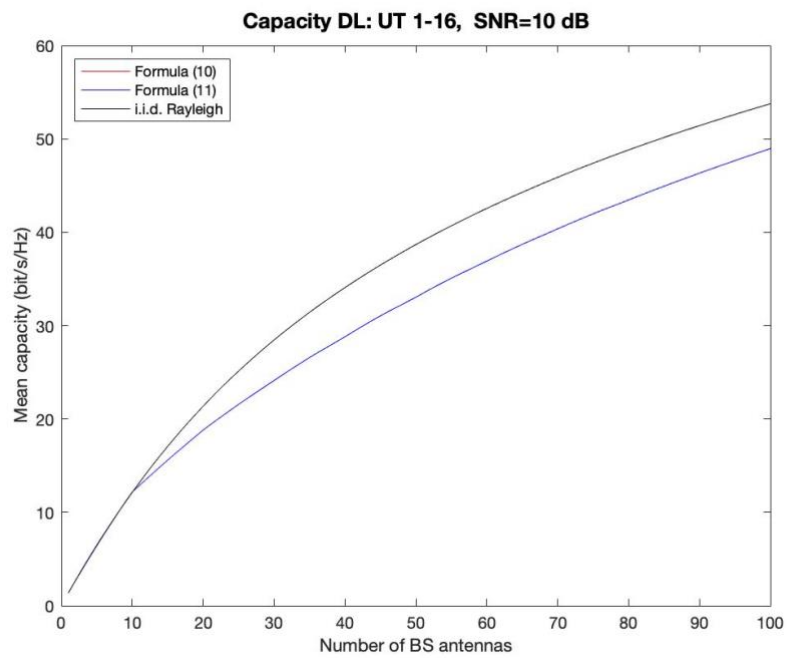


Figura 24: Capacidad del Down-link en función del número de antenas del array en la estación base.

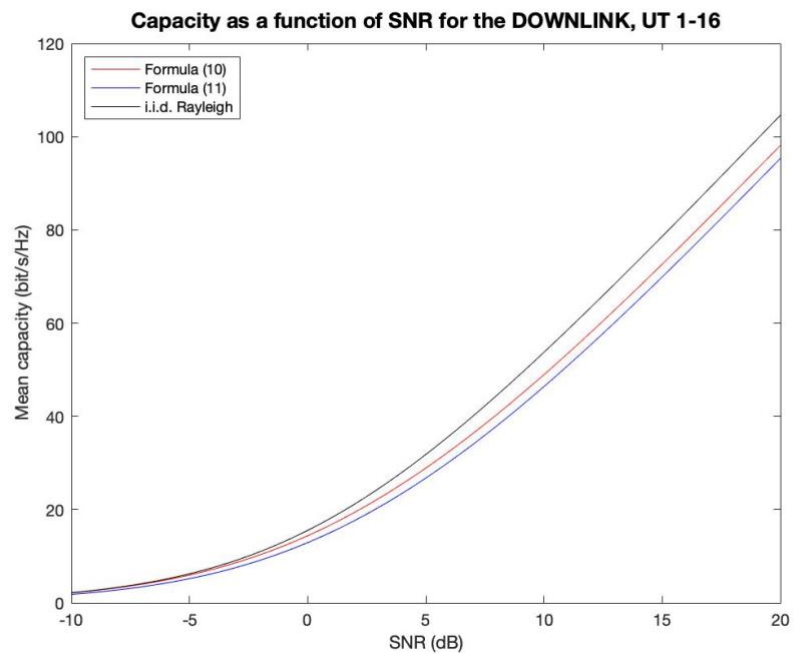


Figura 25: Capacidad del Down-link en función de la SNR del enlace.

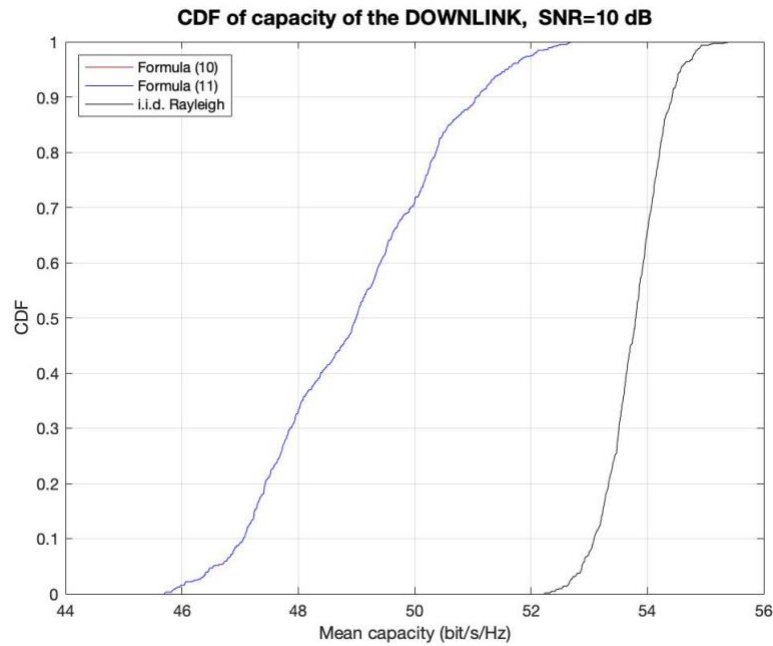


Figura 26: CDF de la capacidad para el Down-link.

6.4.4. Escala de la Capacidad del Down-link

Como se comenta en la Sección 5.3.2, la normalización utilizada en M-MIMO lleva a que el valor de la SNR que aparece en las fórmulas con las que se calcula la capacidad se corresponda con la potencia del transmisor. Es por esto por lo que, si se aplica la Fórmula (12), se obtiene un valor de ρ que, para una estación base con un array de $M = 100$ antenas, un número de usuarios activos $K = 16$ y una SNR del enlace de 10 dB, cuyo valor es el mismo en lineal, es de

$$\rho = \frac{M \cdot SNR}{K} = \frac{100 \cdot 10}{16} = 62.5 \quad (21)$$

Tras escalar el valor de la SNR, o lo que es lo mismo, la potencia del transmisor, e introducir dicho valor en (13) y en (14), se alcanza en el Down-link el valor de la capacidad para el Up-link, como se muestra en las Figura 27 a la Figura 29; y, si se incluyen las curvas obtenidas para el Up-link con lo fórmula (7) a las a estas gráficas, como se hace en las Figura 30 a la Figura 32, se comprueba como las curvas para el Down-link y el Up-link se superponen.

Se demuestra así que, escalando el valor de la SNR (la potencia del transmisor) haciendo uso de (12) y empleando el valor que se obtiene en (21), es posible equiparar las capacidades de ambos canales.

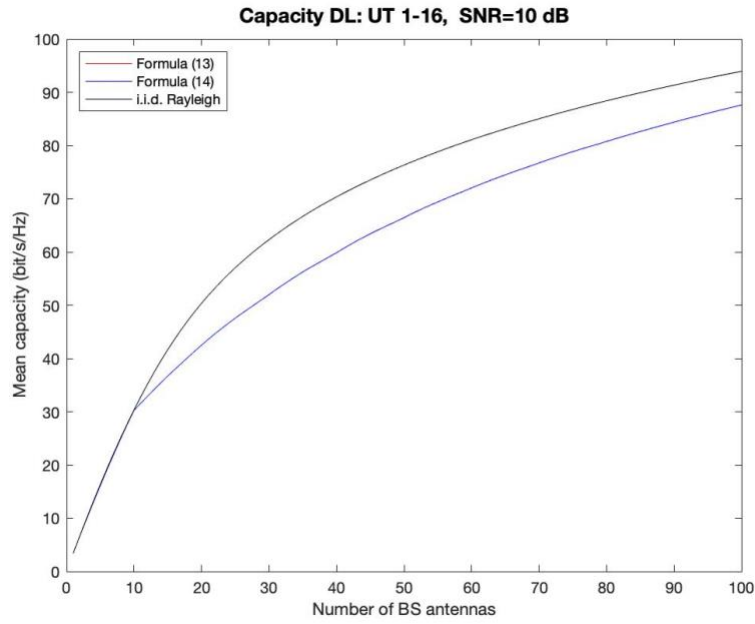


Figura 27: Capacidad del Down-link en función del número de antenas de la estación base tras escalar el valor de la SNR.

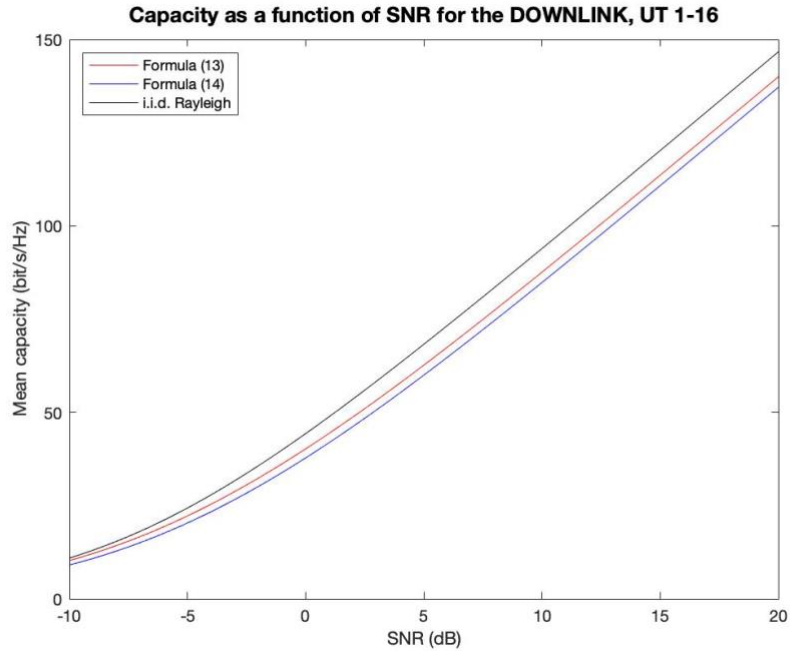


Figura 28: Capacidad del Down-link en función de la SNR del enlace tras escalar dicho valor.

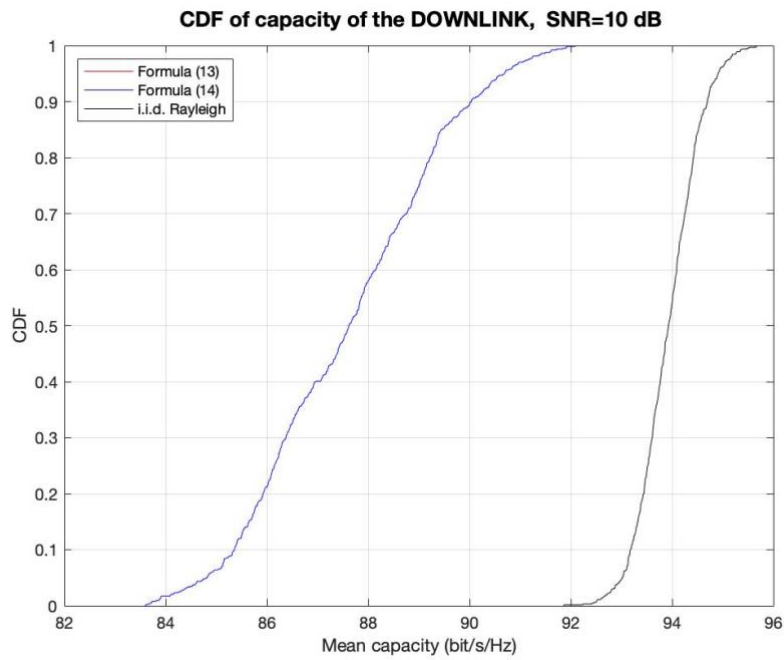


Figura 29: CDF de la capacidad para el Down-link tras escalar el valor de la SNR.

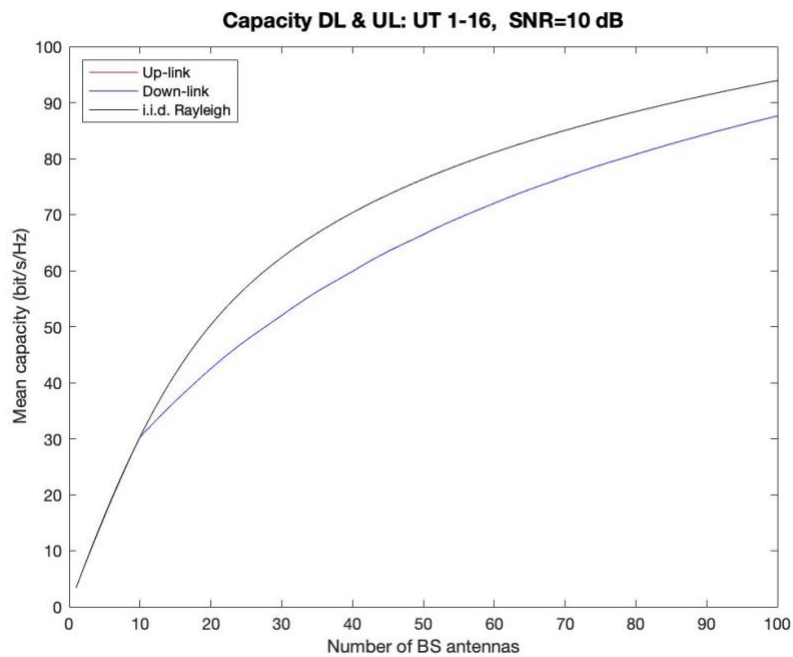


Figura 30: Capacidades tanto del Down-link como del Up-link en función del número de antenas del array en la estación base tras escalar el valor de la SNR para el Down-link.

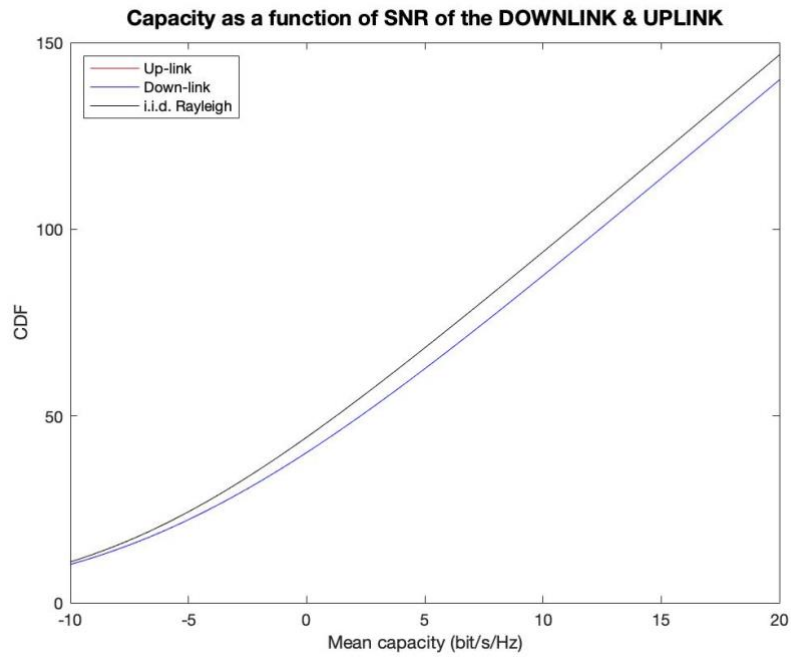


Figura 31: Capacidades del Down-link y del Up-link en función de la SNR del enlace tras escalar dicho valor para el Down-link.

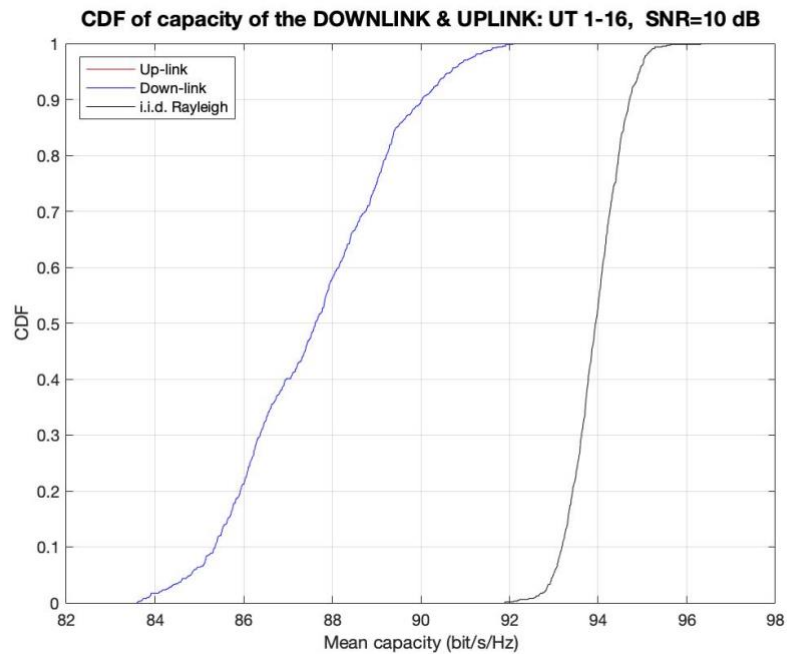


Figura 32: CDF de la capacidad tanto para el Down-link como para el Up-link tras escalar el valor de la SNR para el Down-link.

6.5. Eficiencia espectral

El estudio que se va a presentar con relación a la eficiencia espectral del enlace se ha llevado a cabo con el fin de caracterizar la influencia que el tipo de antena tiene sobre la eficiencia del mismo, ateniéndose a si esta es direccional u omnidireccional, junto con el hecho de cómo la existencia o no de LOS pueda afectar a dicho parámetro, así como la comparativa entre dos normalizaciones para el tratamiento de la potencia. Este es un estudio analítico basado en la campaña medidas llevada a cabo por el grupo de investigación GISAR en la que se analizan dos escenarios diferentes que se presentarán en la siguiente sección.

Este escenario ya ha sido caracterizado previamente desde el punto de vista de la capacidad por [21] bajo las mismas condiciones de simulación que se han utilizado para obtener los resultados que se presentan en esta sección: un enlace Up-link en el que $K = 6$ usuarios activos transmiten a la vez hacia la estación base correspondiente, que en todos los casos consta de $M = 49$ antenas, y con una SNR global de 10 dB. La señal recibida por la estación base de cada uno de los escenarios se denota por

$$y_m(i) = \mathbf{H}(i) \cdot s_k(i) + n_m(i), \quad \forall i = 1, 2, \dots, N_f \quad (22)$$

donde y_m es el vector columna con la información correspondiente a la subportadora i , s_k es el vector columna que contiene la información transmitida por uno de los usuarios activos y n_m es el vector complejo del ruido Gaussiano cuyos elementos tienen varianzas unidad y siguen la distribución i.i.d.

Finalmente, \mathbf{H} es la matriz de canal obtenida de la matriz que contiene las medidas directas del canal sin procesar ($\mathfrak{N}[i]$) y que sigue un proceso de normalización tal que

$$\mathbf{H}_{M \times K} = \mathfrak{N}_{M \times K} \cdot \mathbf{J}_{K \times K} \quad (23)$$

donde la matriz de normalización \mathbf{J} es una matriz diagonal de dimensiones $K \times K$ y cuyos elementos (j_k) se pueden calcular de dos modos diferentes, según el tipo de normalización que se pretenda utilizar, siendo el elemento diferenciador el tratamiento que hacen de la potencia recibida desde cada uno de los usuarios activos: siguiendo la nomenclatura del artículo [21], la primera, la normalización 1 (se denotará N1 en las sucesivas secciones), que también se conoce como normalización de tipo usuario; y la segunda, la normalización 2 (se denotará N2 en las sucesivas secciones), también conocida como normalización de tipo global.

Partiendo de la base de que en ninguno de los enlaces se alcanza la capacidad teórica del enlace i.i.d. Rayleigh, al igual de lo que sucede en la Sección 6.4 de este mismo trabajo, cuando se utiliza la normalización N2, existe una pérdida en la capacidad si se utilizan las antenas direccionales en lugar de las omnidireccionales, pérdida que se agrava en las situaciones NLOS del primer escenario y en las LOS del segundo, frente a las LOS del primero. En el caso del uso de la normalización N1, se obtiene un aumento de la capacidad general, aunque se mantiene el hecho de que la capacidad es mayor para las antenas omnidireccionales, salvo en la situación de LOS del primer escenario.

A lo largo de las siguientes secciones, para la caracterización de estos entornos haciendo uso de la eficiencia espectral se va a hacer un estudio previo de cada una de las distribuciones de los usuarios activos por separado y con independencia de los demás, para pasar de ahí a la comparativa de dichas distribuciones, el objetivo final de este estudio, el cual se basa en las CDFs de la eficiencia espectral para cada usuario, tal y como se presentaba en (18), así como en la acumulada de cada situación, correspondiente a (19), siendo esta última la que se va a utilizar para llevar a cabo la comparativa mencionada. Asimismo, todas estas gráficas van a incluir la CDF de la capacidad acumulada, puesto que esta representa el valor máximo que puede alcanzar la eficiencia espectral y es importante para el estudio del comportamiento en cada uno de los escenarios planteados. Cada una de las gráficas van a incluir cuáles son los usuarios de la Figura 33 de los que proviene la CDF en cuestión, así como una serie de tablas explicativas con los datos más significativos de dichas gráficas, las eficiencias espectrales máxima y mínima para los usuarios por separado y en conjunto, así como los valores máximos y mínimos de la capacidad. También se va a hacer distinción en función de la normalización utilizada.

6.5.1. Entorno de medida

La campaña fue llevada a cabo en el interior del “Edificio de Ingeniería de Telecomunicación Profesor José Luis García García” de la Universidad de Cantabria, que tiene como objeto de estudio los dos escenarios que se presentan en la Figura 33:

- El primero es una sección de una de las plantas del edificio que incluye oficinas, un pasillo central y un laboratorio de ordenadores donde se encuentra la estación base. En este entorno hay un total de 17 usuarios activos: los numerados de 1 a 6 se encuentran con situación de LOS, mientras que aquellos que van del 7 al 17 plantean una situación de NLOS, como se muestra en la parte izquierda de la Figura 33.
- El segundo, por su parte, es una sala multiusos con LOS de todos los usuarios activos, un total de seis, hacia la estación base, representado en la parte derecha de la Figura 33.

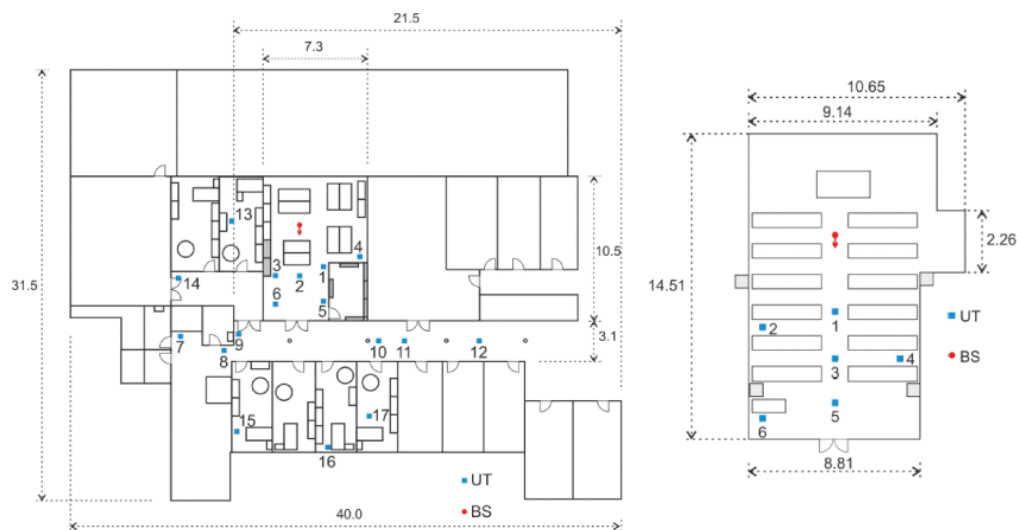


Figura 33: A la izquierda, el primer escenario de la campaña de medidas; a la derecha, el segundo [20].

Las paredes del edificio están recubiertas por yeso, siendo el suelo de hormigón; el techo está compuesto por tablonés y las puertas son metálicas. Todo el mobiliario es de madera, a excepción de unas estanterías que se encuentran en la sala de ordenadores del primer escenario, las cuales aparecen sombreados en gris en la Figura 33.

6.5.2. Normalización 1 (N1) o de tipo usuario

Para esta normalización, los elementos j_k de la matriz de normalización \mathbf{J} toman una serie de valores que compensan el desequilibrio de potencia entre los diferentes usuarios activos, verificándose que

$$j_k = \sqrt{\frac{M}{\frac{1}{N_f} \sum_{j=1}^{N_f} |\mathbf{H}_k[j]|}}, \quad \forall k = 1, \dots, K, \quad (24)$$

aunque se mantienen las variaciones entre las antenas del *array* y entre los tonos de frecuencia [21].

De este modo, N1 modifica la estructura original del canal, lo que se interpreta como que lo que se está implementando es un sistema con un control ideal de la potencia, de modo que la potencia total transmitida por los K usuarios activos no se distribuye de un modo equitativo, sino que a cada uno de los usuarios se le asigna la porción de la potencia total que le corresponde con el fin de que todos los usuarios alcancen la estación base con la misma potencia [21].

Una vez aplicada esta normalización, las eficiencias espectrales que se obtienen son las que se presentan en las Figura 34 a la Figura 39.

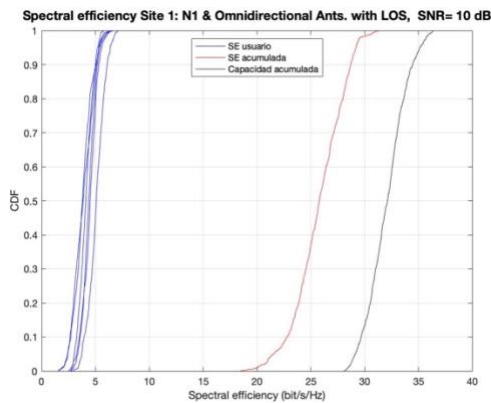


Figura 34: CDFS de la eficiencia espectral y capacidad acumulada para el escenario 1 en situación de LOS con antenas omnidireccionales.

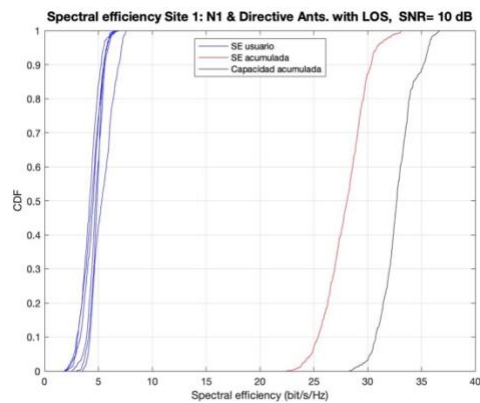


Figura 35: CDFS de la eficiencia espectral y capacidad acumulada para el escenario 1 en situación de LOS con antenas directivas.

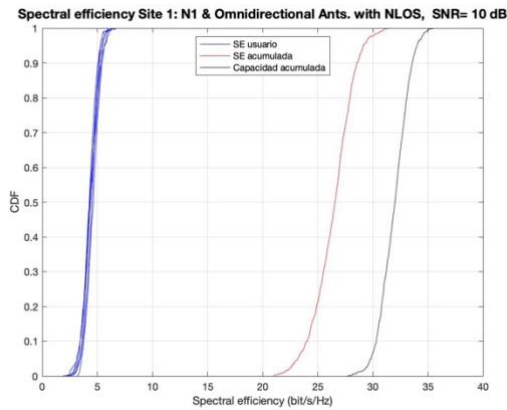


Figura 36: CDFS de la eficiencia espectral y capacidad acumulada para el escenario 1 en situación de NLOS para antenas omnidireccionales

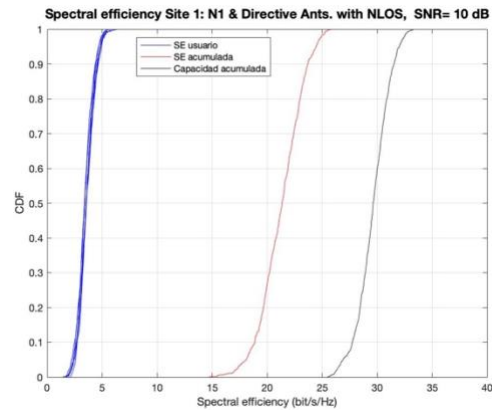


Figura 37: CDFS de la eficiencia espectral y capacidad acumulada para el escenario 1 en situación de NLOS para antenas directivas.

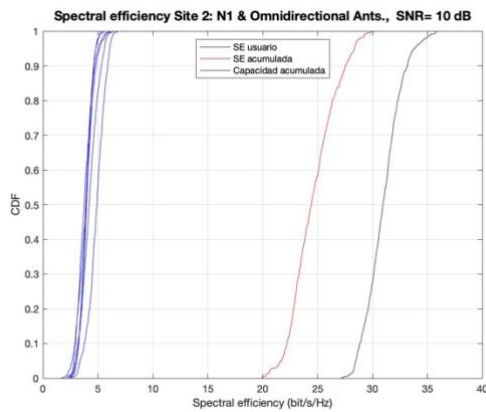


Figura 38: CDFS de la eficiencia espectral y capacidad acumulada para el escenario 2 con antenas omnidireccionales

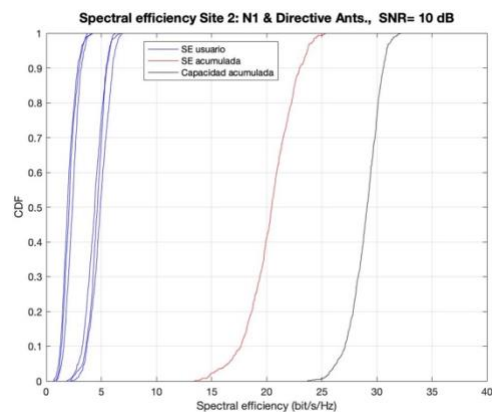


Figura 39: CDFS de la eficiencia espectral y capacidad acumulada para el escenario 2 con antenas directivas.

Tabla 2: Datos significativos en bits/s/Hz de la simulación haciendo uso de la normalización N1 para los escenarios uno (rojo) y dos (azul).

Antena	Situación	SE(min)	SE(max)	SE _T (min)	SE _T (max)	C(min)	C(max)
Omnidir.	LOS	1.56	7.10	18.5	31.35	28.16	36.36
Directiva		1.879	7.562	22.52	33.14	28.34	36.68
Omnidir.	NLOS	1.93	6.65	21.01	31.42	27.75	35.47
Directiva		1.476	6.293	14.77	25.79	25.52	33.25
Omnidir.	LOS	1.71	6.67	19.92	30.12	27.2	35.87
Directiva		0.6488	6.937	13.46	25.33	23.71	32.15

A la vista de los resultados de la Tabla 2, cabe destacar la uniformidad de los resultados para las eficiencias espectrales de los usuarios activos individuales, sobre todo para los valores mínimos, ya que, a excepción de la última disposición (Figura 39), los valores oscilan en un margen de apenas 0.45 bits/s/Hz. Por su parte, los valores máximos individuales tampoco varían excesivamente, pero son algo menos uniformes que los

valores mínimos, con un margen superior de 1.269 bits/s/Hz, casi tres veces más grande que el primero.

Los valores acumulados para la eficiencia espectral, por su parte, si que presentan variaciones más notables, tanto para los valores máximos como para los mínimos, que oscilan en unos márgenes de 7.81 bits/s/Hz y 9.06 bits/s/Hz, respectivamente.

Finalmente, en lo que atañe a los valores de la capacidad acumulada, la diferencia con respecto a los valores de eficiencia espectral acumulada es bastante similar en todas las situaciones presentadas, algo mayor para el caso de las directivas en el escenario 2 y en el 1 en situación de NLOS.

6.5.3. Normalización 2 (N2) o de tipo global

Cuando se aplica la normalización 2 no se aplica control de potencia alguno en el receptor, por lo que los valores tomados por los elementos j_k de la matriz de normalización \mathbf{J} son todos iguales y verifican que

$$j_k = \sqrt{\frac{M \cdot K}{\frac{1}{N_f} \sum_{j=1}^{N_f} \|\mathfrak{R}_k[j]\|}}, \quad \forall k = 1, \dots, K, \quad (25)$$

de modo que la operación (23) es equivalente a multiplicar \mathfrak{R} por un escalar, manteniéndose así las condiciones de propagación inalteradas [21].

Así, a diferencia de la normalización 1, esta, la normalización 2, mantiene la estructura original de la matriz \mathbf{H} , conservando las diferencias en la potencia que la estación base recibe de cada uno de los usuarios activos, así como las variaciones en las antenas de dicha estación base y las de los tonos de frecuencia.

A continuación, en las Figura 40 a la Figura 45, se presentan las mismas gráficas, con la diferencia de que en este caso se va a presentar el resultado que proporciona usar la normalización N2, que en el programa de simulación recibe el nombre de *normalización global*, y que no hace control de potencia alguno en el receptor, si no que procesa la información recibida manteniendo las condiciones de propagación inalteradas.

Para esta normalización, en vista de los valores de la Tabla 3, para las eficiencias espectrales de cada uno de los usuarios activos por separado se aprecian dos tendencias, una para los valores mínimos, que son muy uniformes en función del tipo de antena (<1 bits/s/Hz para las directivas y >1 bits/s/Hz para las omnidireccionales, con valores relativamente uniformes); mientras que la otra se aprecia para los valores máximos, con valores muy uniformes en función del escenario (>7 bits/s/Hz para el escenario 1, con una diferencia máxima de aproximadamente 0.5 bits/s/Hz, mientras que para el dos, ambos están en torno a los 6 bits/s/Hz, con valores que apenas difieren 0.2 bits/s/Hz).

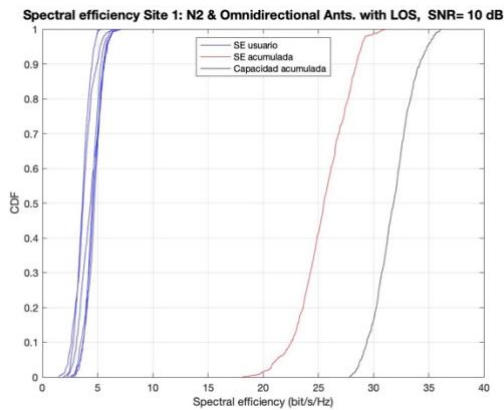


Figura 40: CDFS de la eficiencia espectral y capacidad acumulada para el escenario 1 en situación de LOS con antenas omnidireccionales.

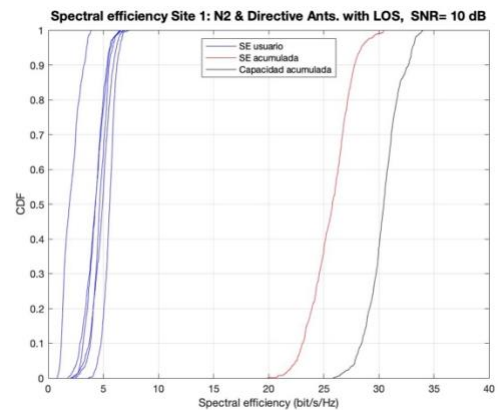


Figura 41: CDFS de la eficiencia espectral y capacidad acumulada para el escenario 1 en situación de LOS con antenas directivas.

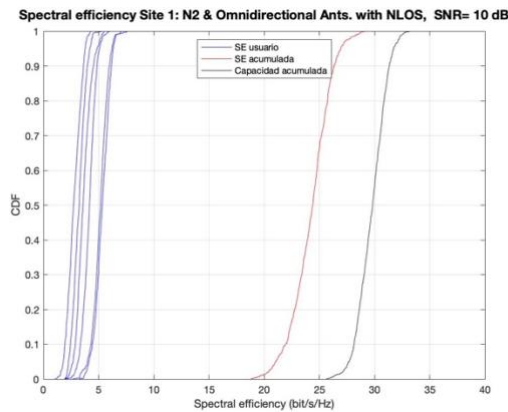


Figura 42: CDFS de la eficiencia espectral y capacidad acumulada para el escenario 1 en situación de NLOS con antenas omnidireccionales.

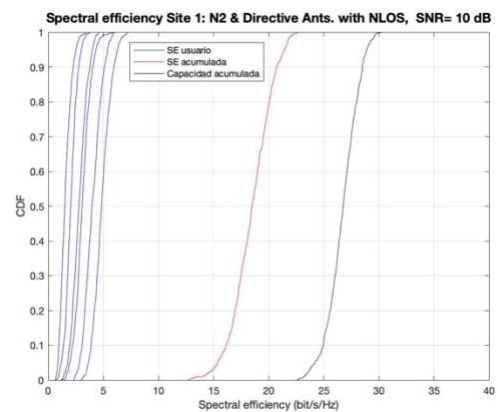


Figura 43: CDFS de la eficiencia espectral y capacidad acumulada para el escenario 1 en situación de NLOS con antenas directivas.

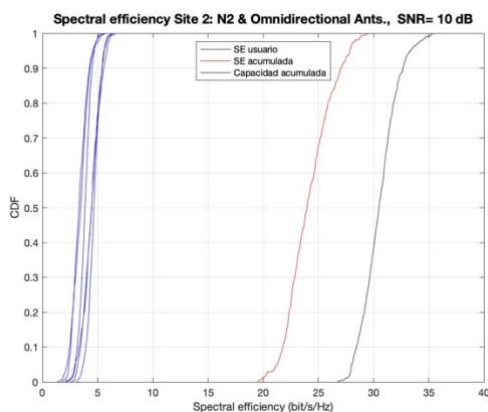


Figura 44: CDFS de la eficiencia espectral y capacidad acumulada para el escenario 2 con antenas omnidireccionales.

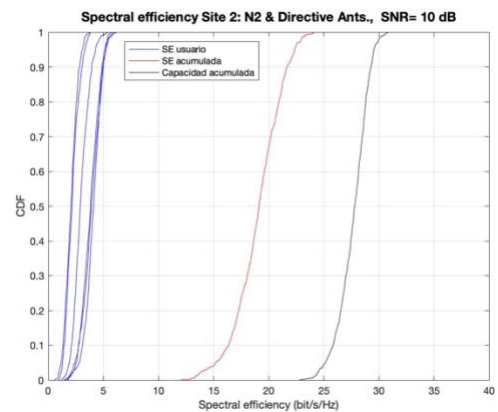


Figura 45: CDFS de la eficiencia espectral y capacidad acumulada para el escenario 2 con antenas directivas.



Tabla 3: Datos significativos en bits/s/Hz de la simulación haciendo uso de la normalización N2 para los escenarios uno (rojo) y dos (azul).

Antena	Situación	SE(min)	SE(max)	SE _T (min)	SE _T (max)	C(min)	C(max)
Omnidir.	LOS	1.511	7.07	18.22	31.07	27.86	36.08
Directiva		0.8139	7.311	19.92	30.48	25.88	34.01
Omnidir.	NLOS	1.07	7.591	18.81	29.1	25.67	33.15
Directiva		0.6263	7.204	12.69	22.63	22.6	30.24
Omnidir.	LOS	1.371	6.373	19.51	29.59	26.78	35.35
Directiva		0.5949	6.176	12.06	24.1	22.84	30.84

Por otro lado, para los valores acumulados, las eficiencias espectrales tienen valores muy uniformes con una tendencia que indica que los valores máximos de las antenas omnidireccionales oscilan alrededor de los 30 bits/s/Hz, y entorno a los 23 bits/s/Hz para las directivas, salvo para el caso de la situación de LOS en el escenario 1, cuyo comportamiento se asemeja al de las omnidireccionales. Algo muy similar sucede para los valores mínimos, con valores en torno a los 18 bits/s/Hz para las antenas omnidireccionales, y sobre los 12 bits/s/Hz para las directivas, salvo, de nuevo, para la del LOS del escenario 1.

Finalmente, la diferencias con la capacidad acumulada son muy similares a las de la normalización 1, con mayores diferencias para las antenas directivas para el escenario 2 y para el 1 en situación de NLOS.

6.5.4. Comparación de los diferentes escenarios

Una vez estudiados los casos más detalladamente, se puede pasar a hacer un estudio de las eficiencias espectrales totales en función de las diferentes disposiciones de los usuarios activos para comprobar cuáles de las antenas, en combinación con una u otra normalización aportan mejores resultados.

Partiendo de la base de que en todos los casos la eficiencia espectral es mayor cuando se utiliza la normalización 1 (con control de la potencia), esta diferencia es más notable para las antenas directivas que para las omnidireccionales.

Por otro lado, en lo que a eficiencias espectrales respecta, el uso de las omnidireccionales aporta mejores resultados que las de las directivas en todas las situaciones a excepción de la primera, donde la eficiencia espectral es mayor para las directivas, salvo en un tramo de aproximadamente el 50% de la normalización 2. Estos resultados concuerdan con el estudio de la capacidad presentado en [21] que se presentaba al comienzo de esta sección, incluso para el caso de la normalización 2 en el escenario 1 con situación de LOS, cuya eficiencia espectral es superior casi siempre a la obtenida con N1, aportando consistencia al estudio del entorno comenzado en [21].

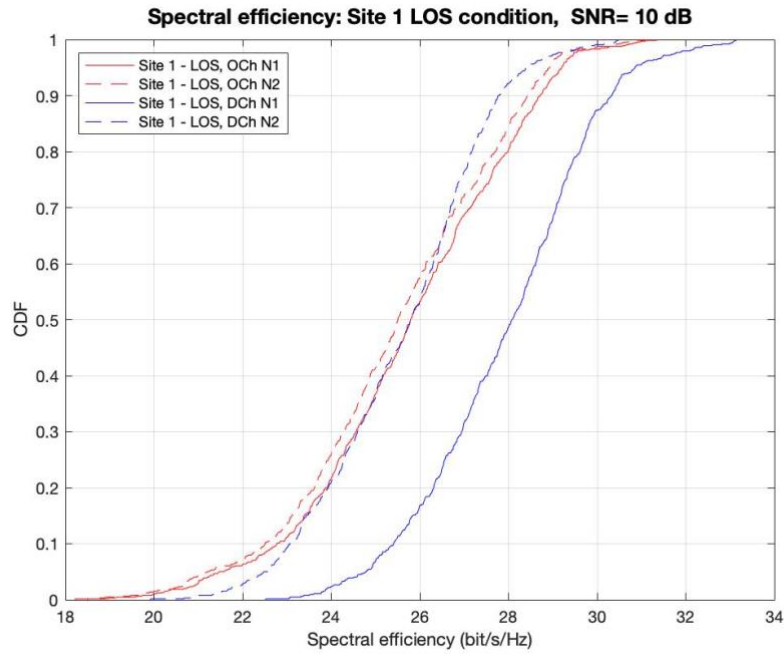


Figura 46: CDFs de las eficiencias espectrales totales del escenario 1 en situación de LOS.

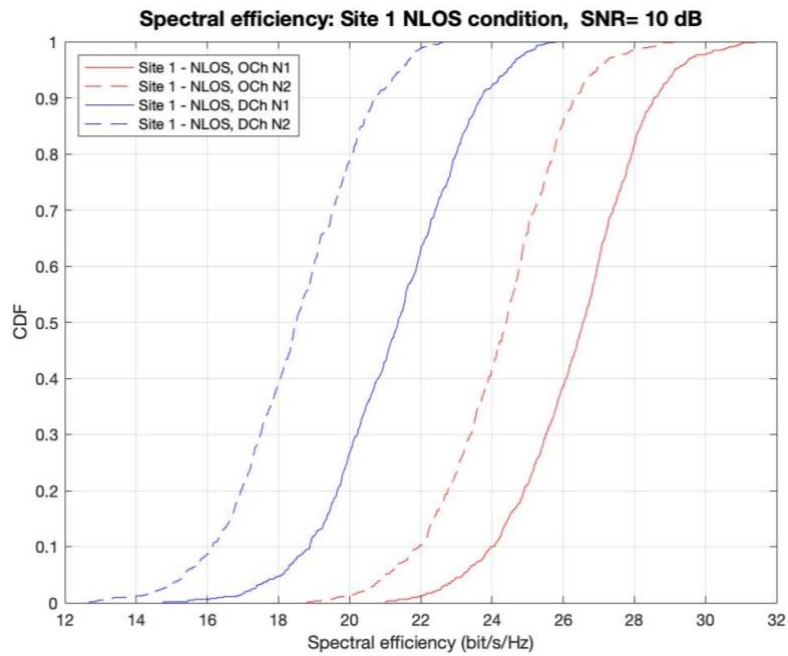


Figura 47: CDFs de las eficiencias espectrales totales del escenario 1 en situación de NLOS.

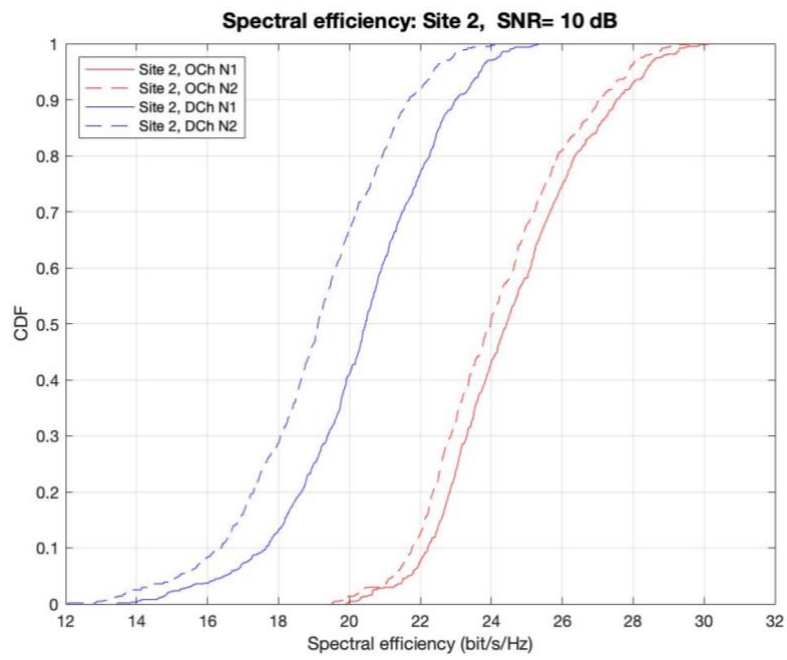


Figura 48: CDFs de las eficiencias espectrales totales del escenario 2.



7. Conclusiones y líneas futuras

7.1. Conclusiones

A lo largo de este trabajo de fin de grado se ha presentado un estudio del canal radio *indoor* haciendo uso de la tecnología M-MIMO para su aplicación a la quinta generación de comunicaciones. Este estudio se ha desarrollado en base a las campañas de medidas llevadas a cabo por el grupo de investigación GISAR en diferentes escenarios para la banda que va desde los 3.2 GHz hasta los 4 GHz, con el fin de caracterizar dicho canal en base a lo presentado en las Secciones 5.3 y 5.4 para los parámetros de capacidad y eficiencia espectral, respectivamente.

En lo que respecta a la caracterización del canal en base al parámetro de capacidad, el objetivo planteado fue el de equiparar la capacidad del Down-link a la del Up-link. Para ello, primero se llevó a cabo un estudio de las capacidades del Up-link y del Down-link por separado, con el fin de encontrar una relación que permitiera escalar el valor de esta última y así equiparar ambas capacidades, alcanzando finalmente la expresión que se muestra en (12). El hecho de llevar a cabo el estudio de la capacidad haciendo un barrido sobre el número de antenas del *array* de la estación base por un lado, y sobre el valor de la SNR global por otro, demuestra el funcionamiento de la expresión obtenida, pues se corrobora así que es efectiva al variar en un rango amplio de valores dos de los parámetros que (12) tiene en consideración (la SNR y M). Por su parte, el hecho de presentar las gráficas para la CDF y que coincidan es fundamental para poder consolidar el funcionamiento de dicha expresión. El factor ρ obtenido representa un aumento en la potencia de transmisión, algo posible puesto que se trata de la estación base quien transmite, y en ella es más fácil llevar a cabo un aumento de potencia ya que, si se reparte entre todas las antenas del *array*, no supone el uso de material excesivamente caro ni de una complejidad demasiado elevada.

Por su parte, la caracterización del canal atendiendo a la eficiencia espectral tenía como objetivo el de continuar el estudio iniciado en [21] y, para ello, comparar el efecto que tiene el hecho de que se utilicen antenas directivas u omnidireccionales para la estación base en diferentes escenarios y condiciones de línea de visión, así como estudiar cuál de las dos normalizaciones presentadas ofrecía un mejor rendimiento. En vista de los resultados obtenidos, es posible afirmar en primer lugar, puesto que se cumple para todos los casos, que la normalización 1, la de tipo usuario, arroja mejores resultados que la de tipo global, la normalización 2, siendo mucho más notable esta mejora para las antenas directivas.

Por otro lado, el comportamiento de las antenas es más complicado de generalizar, puesto que, para una situación de LOS en el primer escenario, las antenas directivas ofrecen un mejor rendimiento que las omnidireccionales. En cambio, para el resto de escenarios sucede justo lo contrario, siendo las antenas omnidireccionales las que ofrecen un rendimiento superior, debido a que la potencia se distribuye peor para las directivas, puesto que los diferentes usuarios alcanzan la estación base con potencias más dispares, ofreciendo una calidad de servicio menos homogénea.

Comparando las dos situaciones de LOS que se presentan, la disposición de los usuarios activos en el primero, estando estos más próximos, así como la estructura de la sala, mucho más pequeña que la segunda, y el mobiliario que en esta se incluye son



factores que inciden de un modo negativo a la eficiencia espectral, haciendo que sean las antenas directivas las que en ese caso aislado aporten un rendimiento mejor al de las omnidireccionales. Estos resultados reflejan la importancia que tiene que los usuarios activos estén dispuestos de un modo homogéneo para así contribuir a la diversidad espacial, para lo que las antenas omnidireccionales son más favorables, salvo cuando las condiciones no lo permiten, siendo las antenas directivas más efectivas cuando la proximidad entre los usuarios aumenta y no es posible que se distribuyan de un modo uniforme.

7.2. Líneas futuras

Por último, como punto final de este TFG, se presentan una serie de posibles proyectos que puedan darle continuación al estudio llevado a cabo a lo largo de estas páginas y en relación con lo estudiado en la parte más teórica de este trabajo.

El estudio que se ha llevado a cabo se ha enfocado en caracterizar el canal radio indoor centrandolo en los parámetros de capacidad y eficiencia espectral. En el caso del estudio de la capacidad, este se podría continuar por explotar todos los recursos que el software utilizado proporciona y estudiar como el factor de escala que permite que la capacidad del Down-link se equipare a la del Up-link afecta al resto de parámetros que caracterizan el canal M-MIMO, como puede ser la propia eficiencia espectral que se estudia en el otro caso de este trabajo, entre otros. Estos parámetros deberían de ser iguales para ambos sentidos del enlace, puesto que ρ los equipara; por ello es interesante comprobar su correcto rendimiento para todos los parámetros mencionados.

Por otro lado, aunque si bien es cierto que en el caso de la eficiencia espectral el estudio era una continuación del iniciado en [21], este se podría complementar estudiando la incidencia que los usuarios activos pueden tener entre ellos más allá de las situaciones concretas que se presentan tanto en [21] como en este TFG. Con esto, lo que se pretende proponer es aprovechar las medidas llevadas a cabo sin necesidad de una nueva campaña de medición, y llevar a cabo un estudio más realista en el escenario 1, puesto que el 2 no ofrece esta posibilidad, en el que se tengan en cuenta usuarios activos con y sin LOS, con el fin de poder analizar la incidencia que los unos puedan tener sobre los otros y viceversa. El hecho de decir que este es un estudio más realista hace referencia a que, en una situación cotidiana *indoor*, una estación base va a dar servicio a ambos tipos de usuarios la mayor parte del tiempo.

Finalmente, en lo que al desarrollo de la red 5G respecta, los siguientes pasos en lo que incumben a la tecnología M-MIMO pasan por repetir los estudios en la frecuencia de los 26 GHz, puesto que es otra de las bandas donde se plantea que se implante la quinta generación de comunicaciones. Esto supone una gran dificultad ya que los costes que implican los dispositivos necesarios son demasiado altos. Es por ello por lo que el análisis que se muestra en este TFG se haya llevado a cabo en la banda que va de los 3.2 GHz hasta los 4 GHz, ya que es la banda en la que se va a hacer el despliegue de la red en una primera instancia, puesto que es una banda asequible en comparación a la de los 26 GHz. No obstante, esta última es una banda muy importante, por lo que se deberían de llevar a cabo mediciones en ella en un futuro próximo, a pesar de las dificultades.

La cantidad de estudios y dispositivos que se están presentando en la banda considerada para este TFG son un gran avance que acerca la implantación de la red 5G.



No obstante, aún queda mucho trabajo por hacer en lo que a esta tecnología respecta, tanto a nivel tecnológico como social, pues una vez sea implantada la red 5G la forma en que los seres humanos interactúan con su entorno cambiará de un modo que supondrá un período de adaptación y regulación de los límites a los que se puede llegar con estas nuevas tecnologías, siempre poniendo a la persona por delante.



Bibliografía y referencias:

- [1] A. K. Sarangi and A. Datta, “Capacity Comparison of SISO, SIMO, MISO MIMO Systems,” in *2018 Second International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC)*, Feb. 2018, pp. 798–801, doi: 10.1109/ICCMC.2018.8488147.
- [2] M. A. Jensen, “A history of MIMO wireless communications,” in *2016 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI)*, Jun. 2016, pp. 681–682, doi: 10.1109/APS.2016.7696049.
- [3] G. J. Foschini, “Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multi-element antennas,” *Bell Labs Tech. J.*, vol. 1, no. 2, pp. 41–59, 1996, doi: 10.1002/bltj.2015.
- [4] G. G. Raleigh and J. M. Cioffi, “Spatio-temporal coding for wireless communication,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 46, no. 3, pp. 357–366, Mar. 1998, doi: 10.1109/26.662641.
- [5] S. M. Alamouti, “A simple transmit diversity technique for wireless communications,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 16, no. 8, pp. 1451–1458, Oct. 1998, doi: 10.1109/49.730453.
- [6] J. Kim and I. Lee, “802.11 WLAN: history and new enabling MIMO techniques for next generation standards,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 53, no. 3, pp. 134–140, Mar. 2015, doi: 10.1109/MCOM.2015.7060495.
- [7] T. L. Marzetta, “Massive MIMO: An Introduction,” *Bell Labs Tech. J.*, vol. 20, pp. 11–22, 2015, doi: 10.15325/BLTJ.2015.2407793.
- [8] L. Hoffmann, “Scaling up,” *Commun. ACM*, vol. 54, no. 12, pp. 144–145, 2011, doi: 10.1145/2043174.2043201.
- [9] L. Lu, G. Y. Li, A. L. Swindlehurst, A. Ashikhmin, and R. Zhang, “An Overview of Massive MIMO: Benefits and Challenges,” *IEEE J. Sel. Top. Signal Process.*, vol. 8, no. 5, pp. 742–758, Oct. 2014, doi: 10.1109/JSTSP.2014.2317671.
- [10] G. L. Agredo-Méndez, P. E. Jojoa-Gómez, and V. Almenar-Terré, “Sistemas MIMO con un elevado número de antenas: clave para la 5G inalámbrica,” *Entramado*, vol. 11, no. 2, pp. 250–261, 2015, doi: 10.18041/entramado.2015v11n2.22240.
- [11] Y. Kim *et al.*, “Full dimension mimo (FD-MIMO): the next evolution of MIMO in LTE systems,” *IEEE Wirel. Commun.*, vol. 21, no. 2, pp. 26–33, Apr. 2014, doi: 10.1109/MWC.2014.6812288.
- [12] E. G. Larsson, O. Edfors, F. Tufvesson, and T. L. Marzetta, “Massive MIMO for next generation wireless systems,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 2, pp. 186–195, Feb. 2014, doi: 10.1109/MCOM.2014.6736761.
- [13] T. L. Marzetta, “Noncooperative Cellular Wireless with Unlimited Numbers of Base Station Antennas,” *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 9, no. 11, pp. 3590–3600, Nov. 2010, doi: 10.1109/TWC.2010.092810.091092.
- [14] C. Shepard *et al.*, “Argos: Practical Many-Antenna Base Stations,” in *Proceedings of the 18th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, 2012, pp. 53–64, doi: 10.1145/2348543.2348553.
- [15] R. P. Torres *et al.*, “Empirical characterisation of the indoor multi-user MIMO channel in the 3.5 GHz band,” *IET Microwaves, Antennas Propag.*, vol. 13, no. 13, pp. 2386–2390, 2019, doi: 10.1049/iet-map.2018.6215.
- [16] T. L. Marzetta, “How Much Training is Required for Multiuser Mimo?,” in *2006*



- Fortieth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, Oct. 2006, pp. 359–363, doi: 10.1109/ACSSC.2006.354768.
- [17] X. Gao, O. Edfors, F. Rusek, and F. Tufvesson, “Massive MIMO Performance Evaluation Based on Measured Propagation Data,” *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 14, no. 7, pp. 3899–3911, 2015, doi: 10.1109/TWC.2015.2414413.
- [18] S. Tomazic, “Spectral efficiency curve,” p. 1, 2000, doi: 10.1081/E-EWMC-120043448.
- [19] E. Björnson, J. Hoydis, and L. Sanguinetti, “Massive MIMO Networks,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 1, no. 1, p. 4, 2017, doi: 10.1561/20000000093.Simulation.
- [20] J. R. Pérez, R. P. Torres, M. Domingo, L. Valle, and J. Basterrechea, “Analysis of Massive MIMO Performance in an Indoor Picocell With High Number of Users,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 107025–107034, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3000602.
- [21] J. R. Pérez and R. P. Torres, “On the Impact of the Radiation Pattern of the Antenna Element on MU-MIMO Indoor Channels,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 25459–25467, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2970769.
- [22] T. Philosof and R. Zamir, *The cost of uncorrelation and non-cooperation in MIMO channels*. 2005.
- [23] S. Khan, A. Chockalingam, and B. S. Rajan, *A Low-Complexity Precoder for Large Multiuser MISO Systems*. 2008.