



Universitat de les
Illes Balears



Treball Final de Grau

GRAU EN ENGINYERIA TELEMÀTICA

Gestión de las interferencias en redes de
comunicaciones móviles 5G: MIMO Masivo
vs MIMO Cooperativo

ALEXANDRE JAUME SALDAÑA PLOMER

Tutors

Guillem Femenias Nadal

Felip Riera Palou

Escola Politècnica Superior
Universitat de les Illes Balears
Palma, 8 de septiembre de 2017

En primer lugar, quisiera agradecer a la Escuela Politécnica Superior de la Universidad de la Islas Baleares la creación del Grado de Telemática y por supuesto, a todos sus integrantes, desde personal docente hasta la directora de la EPS por su esfuerzo para mejorar continuamente la calidad de los estudios.

A mis tutores Guillem Femenias Nadal y Felip Riera Palou quiero agradecerles todo el ánimo y apoyo que me han otorgado durante estos meses. Siempre han tenido una palabra de aliento para mí. Todos los problemas que me han ido surgiendo los han solucionado de forma inmediata haciendo de este TFG una experiencia enriquecedora tanto a nivel académico como personal. Gracias a ellos, la realización de este proyecto ha sido mucho más interesante y mi interés por el campo de investigación tratado no ha hecho más que crecer continuamente.

A mi familia y amigos que siempre han estado ahí cuando los he necesitado, y a mis dos compañeras especiales, Layla y Luna, que noche tras noche han estado expectantes del progreso de mi proyecto.

ÍNDICE GENERAL

Índice general	iii
Índice de figuras	v
Acrónimos	vii
Resumen	ix
1 Introducción	1
2 Conceptos clave en redes celulares	5
2.1 MIMO	6
2.1.1 Modelo básico de un sistema MIMO	7
2.2 Duplexación por división de tiempo	8
2.2.1 TDD vs FDD	8
2.3 Reutilización frecuencial	9
2.4 Diversidad	10
2.5 Beamforming	11
2.6 Zero-Forcing	12
3 Network MIMO	15
3.1 Principios básicos	15
3.2 Notas sobre Network MIMO	16
3.3 Cooperative MIMO en sistemas celulares	17
3.3.1 CoMP	17
3.3.2 Modelos de canal	19
3.3.3 CoMP en el canal de bajada	20
3.3.4 Backhaul en CoMP	22
3.4 Descripción Matemática	23
3.4.1 Notación	23
3.4.2 Modelo del sistema	23
4 Large-Scale MIMO	27
4.1 Introducción y principios básicos	27
4.2 Evolución de MU-MIMO a MIMO Masivo	28
4.2.1 MU-MIMO	28
4.2.2 MIMO Masivo	29
4.3 Potencial de MIMO Masivo	30

4.3.1	Incremento de la capacidad	30
4.3.2	Componentes económicos de bajo consumo	31
4.3.3	Reducción de latencia	32
4.3.4	Simplificación del acceso a capa MAC	32
4.3.5	Incremento de la robustez contra interferencias	32
4.4	Descripción Matemática	33
4.4.1	Modelo del sistema	33
5	Resultados	37
5.1	Descripción del entorno	37
5.2	Potencia de señal deseada	39
5.2.1	Potencia de señal aumentando grados de libertad	41
5.3	Potencia de la interferencia	42
5.3.1	Potencia de interferencia aumentando grados de libertad	43
5.4	Potencia de señal en una celda	45
5.5	Potencia de interferencia en una celda	48
5.6	SINR en una celda	50
6	Conclusiones	53
	Bibliografía	55

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1	Clúster con una configuración tradicional de 7 celdas (a) y 3 celdas(b) . . .	2
2.1	Modelo tradicional de reutilización de frecuencias en sistemas celulares con un factor $K=7$	6
2.2	Simple esquema del funcionamiento de los sistemas MIMO.	8
2.3	Esquema de un sistema con diversidad	10
2.4	Ejemplo de modelo SIMO, MISO, MIMO respectivamente	11
2.5	Modelo de radiación clásico vs <i>beamforming</i>	12
3.1	Esquema de transmisión del canal de bajada en <i>Network</i> MIMO para uno de los múltiples usuarios	16
3.2	Tres tipos de cooperative MIMO en sistemas celulares: a) CoMP; b) repetidor fijo; c) repetidor móvil	18
3.3	Clúster no adaptativo vs clúster adaptativo	22
4.1	Configuración de un sistema MIMO Masivo	28
4.2	Algunas configuraciones de antenas posibles y escenarios para una estación de MIMO Masivo	30
5.1	Simple esquema de la topología de red utilizada para las simulaciones. Se observan 9 clústers constituidos por 4 celdas cada uno, y cada celda equipada con una BS representada como un círculo. Los círculos rojos representan las ubicaciones de los usuarios estudiados en el proyecto.	39
5.2	Potencia de señal deseada del usuario ubicado en (1515m,1515m) los sistemas LS-MIMO y N-MIMO. Teniendo en cuenta que $\zeta = 1$	40
5.3	Potencia de señal deseada del usuario ubicado en (1735m,1735m) los sistemas LS-MIMO y N-MIMO. Teniendo en cuenta que $\zeta = 1$	40
5.4	CCDF de la potencia de señal deseada para el usuario ubicado en (1515m,1515m) en los sistemas LS-MIMO y N-MIMO al aumentar los grados de libertad.	41
5.5	CCDF de la potencia de señal deseada para el usuario ubicado en (1735m,1735m) en los sistemas LS-MIMO y N-MIMO al aumentar los grados de libertad.	42
5.6	CDF de la potencia de interferencia agregada para el usuario ubicado en (1515m,1515m) en los sistemas LS-MIMO y N-MIMO.	43
5.7	CDF de la potencia de interferencia agregada para el usuario ubicado en (1735m,1735m) en los sistemas LS-MIMO y N-MIMO.	43

5.8	CDF de la potencia de interferencia agregada para el usuario ubicado en (1515m,1515m) en los sistemas LS-MIMO y N-MIMO al aumentar los grados de libertad.	44
5.9	CDF de la potencia de interferencia agregada para el usuario ubicados en (1735m,1735m) en los sistemas LS-MIMO y N-MIMO al aumentar los grados de libertad.	44
5.10	Celda del clúster central sobre la que se realiza el estudio	45
5.11	Distribución de la potencia de señal recibida en una celda LS-MIMO	46
5.12	Distribución de la potencia de señal recibida en una celda N-MIMO	46
5.13	Vista de planta de la distribución de la potencia en una celda LS-MIMO . .	47
5.14	Vista de planta de la distribución de la potencia en una celda N-MIMO . .	47
5.15	Distribución de la potencia de interferencia recibida en una celda LS-MIMO	48
5.16	Distribución de la potencia de interferencia recibida en una celda N-MIMO	49
5.17	Vista de planta de la distribución de la interferencia en una celda LS-MIMO	49
5.18	Vista de planta de la distribución de la interferencia en una celda N-MIMO	50
5.19	Distribución de la SINR en una celda LS-MIMO.	51
5.20	Distribución de la SINR en una celda N-MIMO.	51
5.21	Vista de planta de la distribución de la SINR en una celda LS-MIMO.	52
5.22	Vista de planta de la distribución de la SINR en una celda N-MIMO.	52

ACRÓNIMOS

BS Base Station

MS Mobile Station

MIMO Multiple Input Multiple Output

TDD Time Division Duplexing

FDD Frequency Division Duplexing

CoMP Cooperative Multi Point

TFG Trabajo Final de Grado

SINR Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio

LS Large Scale

LSM Large Scale MIMO

NM Network MIMO

CSI Channel State Information

ZF Zero Forcing

LTE Long Term Evolution

MU-MIMO Multi-User MIMO

RESUMEN

Las redes de comunicaciones móviles tradicionales presentan una estructura celular compuesta por un conjunto de estaciones base (en inglés, Base Station (BS)) que trabajan de forma independiente y gestionan las interferencias co-canal producidas por las otras BSs como ruido térmico. Durante la última década, estos sistemas han funcionado correctamente gracias a los factores de reutilización frecuencial empleados con agrupaciones de tres, siete o incluso más BSs que producían una interferencia co-canal moderadamente baja. Cabe destacar, que en estos sistemas celulares a medida que un usuario se aleja de la zona central, es decir, se acerca a las zonas exteriores de la celda, el problema de la aparición de señales interferentes se acentúa y se vuelve especialmente grave. El aumento espectacular en el número de terminales móviles, así como las tasas de transmisión requeridas en la actualidad para cubrir los diferentes servicios en red, obliga a las nuevas generaciones móviles (4G/5G) a optimizar su eficiencia espectral. Para ello, las redes 4G/5G se caracterizan por despliegues más densos y la reutilización universal de frecuencias (todas las BSs del sistema transmiten sobre la misma banda frecuencial, disponen de todo el ancho de banda del sistema). Como consecuencia, la interferencia co-canal aumenta drásticamente provocando una disminución en la capacidad de transmisión de datos, especialmente para aquellos usuarios que se encuentran en los límites de la celda.

En este Trabajo Final de Grado (TFG) se estudian diferentes técnicas de mitigación de interferencia intercelular para gestionar los efectos negativos de la interferencia co-canal. Para ello, el TFG se centra en dos de las técnicas más destacadas como serían MIMO Masivo [1],[6],[2], también conocido como MIMO a gran escala (*Large Scale MIMO* o LS-MIMO), basado en desplegar una gran cantidad de antenas en cada una de las BS, y MIMO Cooperativo [3],[4],[5],[2] (Cooperative Multi Point o CoMP), también conocido como MIMO en red (*Network MIMO*), basado en una red troncal (*backhaul link*) a través de la cual se comparte información del sistema entre las diferentes BSs para optimizar la gestión de las interferencias. En este proyecto se simula un entorno realista (basado en [6]) en el cual se implementan ambas tecnologías y se compara su rendimiento en términos de potencia de señal, potencia de interferencia y SINR. El conjunto de BSs desplegadas se agrupan en grupos de celdas cooperativas denominados clústers dentro de los cuales se aplican diferentes técnicas cooperativas con el fin de mitigar la interferencia co-canal. Se hace especial hincapié en los resultados de ambas técnicas al aplicarse en dos ubicaciones concretas representativas de dos puntos de operación marcadamente diferentes: en las cercanías a la zona central del clúster y en las proximidades a una de las BS que constituyen el clúster. Finalmente, se realiza un estudio de las diferentes métricas a lo largo de toda la celda y como varían éstas

en función de la localización del usuario. Se concluye a partir de estas realizaciones que tanto MIMO Masivo como *Network* MIMO son capaces de mitigar completamente la interferencia intraclúster, si ambas técnicas están sometidas a niveles de interferencia interclúster similares. Sin embargo, MIMO Masivo presenta unas prestaciones superiores en cuanto a potencia de señal deseada respecto a *Network* MIMO como consecuencia del origen de las señales de ambos sistemas, mientras que en MIMO Masivo el usuario recibe toda la información de su BS más cercana, en *Network* MIMO el conjunto de señales recibidas por el usuario se ven atenuadas por la distancia al provenir de las diferentes BSs del clúster.

INTRODUCCIÓN

La sociedad actual se caracteriza por ser una sociedad cada vez más tecnológica donde el uso de *smartphones*, *tablets*, *e-books*, ... ha aumentado exponencialmente en los últimos años. La población está transformando la comunicación hacia una vertiente cada vez más digital donde la interacción entre personas se basa en el intercambio de mensajes a través de *apps*, tales como, *WhatsApp*, *Telegram*, *Facebook*, *Twitter*, ... donde el volumen de información (texto, contenidos multimedia) que se transporta es realmente inmenso. En consecuencia, las necesidades de capacidad de transmisión de datos que tienen los usuarios hoy en día son cada vez mayores: la gran cantidad de contenidos multimedia (imágenes, vídeos y audios) que se transmiten en la red, además de nuevos servicios como llamadas IP o *streaming* han aumentado extraordinariamente la demanda de los usuarios que cuentan con un equipamiento cada vez más potente capaz de procesar una gran cantidad de información.

Ante esta revolución, el mundo de las telecomunicaciones debe innovar y avanzar para plantar cara a los retos que se presentan para los próximos años. Según [7], se prevé que en el año 2020 habrá 5500 millones de usuarios móviles a nivel global (70% de la población) con una media de 1,5 conexiones por persona. Se estima que el aumento de la demanda de contenido multiplicará por ocho el tráfico global de datos móviles en los próximos cinco años donde se vaticina un importante crecimiento del vídeo móvil, con tasas que superarán a cualquier otro tipo de aplicación móvil. En consecuencia, el uso de dispositivos conectados a redes 4G se hará predominante superando a 2G en 2018 y 3G en 2020. Así pues, un tema crítico es la mejora de la eficiencia espectral para poder abordar estos objetivos de cara a un futuro. Para ello, se deben madurar las redes celulares actuales en cuanto al factor de reutilización de frecuencias; hoy en día, se utilizan clústers compuestos por 3 o 7 celdas (Fig. 1.1), típicamente, donde cada celda tiene asignado un rango frecuencial diferente, esto conlleva que los niveles de interferencia co-canal (interferencia procedente de otras celdas que utilizan el mismo rango frecuencial) sean muy bajos, pero, en contrapartida, disminuye notablemente la capacidad del sistema y ofrece una pobre eficiencia espectral. Debido a las necesidades

que se hallan en las redes de telecomunicaciones modernas, los despliegues de red actuales se caracterizarán por aumentar notablemente la densidad de BSs y hacer uso de la reutilización universal de frecuencias, esto es, que todas las BSs transmitan sobre todo el ancho de banda disponible en el sistema sin hacer ningún tipo de repartición de espectro. Lógicamente, esto conlleva un aumento notorio en la interferencia co-canal, siendo éste uno de los principales factores limitantes en el desarrollo de las nuevas generaciones 4G/5G, pues condiciona la capacidad de transmisión de datos disminuyendo los niveles de Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio (SINR) de los diferentes usuarios. Con el propósito de afrontar este nuevo problema aparecen diferentes técnicas de entre las cuales, en este TFG, se destacan dos: las centradas en MIMO a gran escala y las basadas en MIMO cooperativo [6].

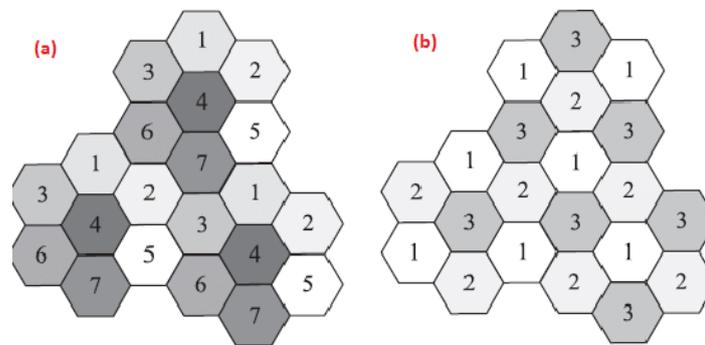


Figura 1.1: Clúster con una configuración tradicional de 7 celdas (a) y 3 celdas(b)

Cuando se habla de un sistema Large Scale MIMO (LSM) se hace alusión a una tecnología que consta de un gran número de antenas en cada una de sus BSs para combatir la interferencia intra e intercelular. Al tener una gran cantidad de antenas en transmisión, cuando se provee servicio a un usuario con 1 o 2 antenas, no solo se puede ofrecer mejor calidad de señal, sino que se pueden explotar las múltiples dimensiones espaciales para implementar ciertas técnicas de coordinación de interferencias. Estas técnicas están basadas en el conocimiento del estado del canal, *Channel State Information (CSI)*, de los usuarios dentro del clúster que a través de la utilización de *beamforming* en el canal de bajada permiten cancelar la interferencia co-canal producida en los equipamientos de usuario de otras celdas del clúster.

Por otra parte, los sistemas cooperativos Cooperative Multi Point (CoMP) se centran, especialmente, en el uso de una red troncal (*backhaul link*), por la cual circulan la información sobre el estado del canal de todos los dispositivos a los que se les proporciona servicio y los datos que se han de transmitir a estos terminales. Por lo tanto, todas las BSs cooperantes proveen servicio a los usuarios de forma unificada, permitiendo aplicar técnicas de transmisión conjunta para controlar/eliminar la interferencia co-canal y asumir tasas de transmisión próximas a los límites marcados por la capacidad del canal.

El objetivo de este TFG es comparar ambas técnicas de mitigación de interferencia intercelular y valorar cual presenta mejores características y condiciones para convertirse en la tecnología preferible en las generaciones futuras. Cabe destacar que esta comparativa no presenta una respuesta obvia *a priori* debido a las diferentes ventajas y desventajas que son observadas en una u otra tecnología. Con este propósito, se simulará la red propuesta en [6] donde se analizarán diferentes parámetros sensibles del sistema como son: la potencia de señal útil, la potencia de interferencia y la SINR. Estos parámetros serán estudiados para dos perfiles de usuarios, en primer lugar, un usuario ubicado en el centro del clúster donde las técnicas de coordinación de las BSs se supone que tienen un mejor rendimiento; y un segundo escenario donde el usuario se encuentra ubicado en una zona muy próxima a una de las BSs donde, teóricamente, el nivel de prestaciones es inferior. Además se estudiará cómo afecta el número de grados de libertad en el sistema variando el número de antenas desplegadas en cada BS.

Finalmente, se ampliará el estudio y se analizará el comportamiento de estos parámetros para todo el área de una celda. Se comparará el rendimiento de ambos sistemas a nivel de celda y se observará como, en líneas generales, la tecnología de LSM ofrece mejores prestaciones que Network MIMO (NM) en toda la región celular.

La estructura de la memoria será la descrita a continuación:

En el Capítulo 1 se comentan diferentes conceptos destacados en sistemas de comunicaciones móviles que aparecerán a lo largo del documento. Pretende ser una base introductoria a diferentes términos de este TFG, pero, sin entrar en un detalle exhaustivo de cada uno de ellos pues no es el propósito de este proyecto. Los conceptos que se tratarán en este capítulo son : red celular, Time Division Duplexing (TDD), Zero Forcing (ZF), *beamforming*, reutilización universal de frecuencias y diversidad (se centra en la espacial que es la que tiene relevancia en este TFG).

A continuación, en el segundo capítulo se hablará de MIMO Cooperativo o *Network MIMO*, profundizando en el concepto que engloban esas palabras fundamentándonos en su arquitectura más destacada como sería CoMP. Se mostrará especial interés en el canal de bajada que plantea esta tecnología ya que es el canal en el cual se centra este proyecto y, para concluir, el modelo matemático empleado para este proyecto en el momento de realizar las simulaciones.

En el Capítulo número 3 se analizará la otra tecnología de este proyecto, Large Scale MIMO. Se explicará como surge LSM y las ventajas que ofrece respecto otras implementaciones MIMO como, por ejemplo, Multi-User MIMO. También se esclarecerá de donde proviene el potencial de LSM con diversas características de esta arquitectura que lo convierten en el principal referente para las generaciones futuras. Para finalizar, también se analizarán los modelos matemáticos que se utilizarán en este proyecto en el momento de estudiar LSM.

En el cuarto capítulo se encontrarán todos los resultados obtenidos durante el desarrollo de este proyecto. A través de múltiples gráficas donde se contrapondrán LSM y NM se examinarán todos los aspectos comentados anteriormente comparando

1. INTRODUCCIÓN

ambas tecnologías y a través de estos resultados se concluirá cual se postula como la técnica de mitigación de interferencias adoptada en redes 4G/5G. En primer lugar se realizará un estudio a nivel de individuo, con dos ubicaciones muy específicas dentro del clúster y, a continuación, se efectuará un análisis de rendimiento de los diferentes parámetros a nivel celular cubriendo toda su área de servicio.

En último lugar, habrá un capítulo de conclusiones donde se sintetizarán las ideas principales obtenidas como producto de la realización de este TFG y se proponen posibles líneas de trabajo futuro.

CONCEPTOS CLAVE EN REDES CELULARES

Una red celular está formada por celdas cada una con su propio punto de acceso, conocido como BS. Estas celdas son usadas con el objetivo de cubrir diferentes áreas para proveer cobertura radio sobre grandes extensiones de terreno. Una celda, típicamente, utiliza un rango de frecuencias diferente al de sus celdas vecinas para evitar la interferencia intercelular y proporcionar una calidad de servicio garantizada como se refleja en la Fig. 2.1. Si este concepto de reutilización no fuera implementado, todas las celdas transmitirían sobre la misma región del espectro ocasionando señales interferentes a todos los usuarios de las otras celdas. Además, la diferencia entre los usuarios centrales de la celda y los que se encuentran en los límites de ésta cabe ser remarcada. Mientras los usuarios de la zona central serían provistos con señales de mayor potencia y están más alejados de las BSs interferentes, por lo tanto, experimentarían valores de SINR muy elevados; los usuarios de las zonas limítrofes recibirían con intensidades similares tanto las señales útiles como las señales interferentes de celdas adyacentes dificultando considerablemente la recepción de la información. Esta sería la definición clásica de red celular, la cual deberá actualizarse para plantar cara a los retos que presenta la sociedad actual.



Figura 2.1: Modelo tradicional de reutilización de frecuencias en sistemas celulares con un factor $K=7$

La red celular proporciona cobertura radio en una amplia área geográfica. Esto permite que un gran número de transceptores portátiles (por ejemplo, teléfonos móviles, *tablets*, etc.) se comuniquen entre sí y con transceptores fijos y teléfonos en cualquier lugar de la red, a través de BSs, incluso si algunos de los transceptores están pasando por más de una celda durante la transmisión gracias al mecanismo de *handover*. Las redes celulares presentan una serie de ventajas:

- Aumentan la capacidad del sistema al reutilizar frecuencias en diferentes celdas.
- Debido al gran número de BSs desplegadas, los terminales móviles pueden transmitir a menor potencia ya que siempre disponen de una BS cercana.
- Grandes áreas de cobertura pueden ser cubiertas con este sistema en comparación a sistemas que tan solo implementan un transmisor de alta potencia.

A continuación, un conjunto de mecanismos utilizados en redes celulares, tales como, MIMO, TDD, reutilización frecuencial, diversidad, *beamforming* y ZF serán expuestos para ofrecer una visión global más completa de las redes celulares.

2.1 MIMO

Una de las grandes revoluciones en el mundo de las telecomunicaciones fue la aparición del concepto Multiple Input Multiple Output (MIMO). A finales de los 90, se consiguió un salto cualitativo al plantear sistemas con múltiples antenas en transmisión (MISO, MIMO). MIMO penetró rápidamente en la industria de las comunicaciones.

MIMO se puede definir como un método para multiplicar la capacidad de enlaces radio a través de la utilización de múltiples antenas en emisión y recepción con el fin de explotar la propagación multicamino. Aunque ya desde los 50/60 se utilizaba SIMO, es el hecho de utilizar múltiples antenas transmisoras el que hace que la capacidad del sistema aumente de manera muy significativa. MIMO se ha convertido en un elemento esencial de los estándares de comunicaciones inalámbricas incluyendo HSPA+(3G), WiMAX(4G), Long Term Evolution (LTE)(4G) y WiFi.

2.1.1 Modelo básico de un sistema MIMO

Un modelo clásico de MIMO (Fig. 2.2) se caracteriza por :

- M, N antenas en transmisión y recepción, respectivamente, generando un total de $M \times N$ canales para explotar en el sistema.
- Se supone la transmisión sobre canales de banda estrecha (el uso de OFDM permite convertir un canal de banda ancha en múltiples canales adyacentes de banda estrecha).
- Así pues se obtiene un modelo de transmisión equivalente paso bajo sencillo para un instante t , con matrices de números complejos en el que el vector de N muestras recibidas se puede expresar en función del vector de M muestras transmitidas \mathbf{x} como

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (2.1)$$

o, de forma equivalente,

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_i \\ \vdots \\ y_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \cdots & & h_{1M} \\ & h_{21} & h_{22} & & \vdots \\ & \vdots & & \ddots & \\ & & & h_{ij} & \\ & & & & \ddots \\ h_{N1} & & & & h_{NM} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_j \\ \vdots \\ x_M \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ \vdots \\ n_i \\ \vdots \\ n_N \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

donde y_i es la muestra recibida en la antena receptora i , x_j es la muestra transmitida sobre la antena transmisora j , h_{ij} representa el canal para el usuario i respecto del emisor j y n_i es una muestra de AWGN.

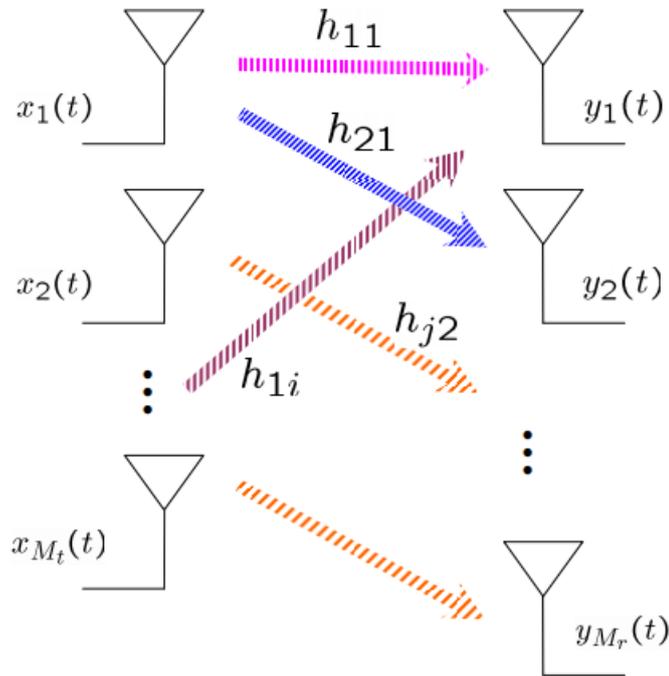


Figura 2.2: Simple esquema del funcionamiento de los sistemas MIMO.

2.2 Duplexación por división de tiempo

La **duplexación por división de tiempo** (Time-Division Duplexing, TDD) es una técnica para convertir un canal símplex en un canal dúplex (canal capaz de mantener una comunicación bidireccional, enviando y recibiendo mensajes sobre todo el ancho de banda disponible) separando las señales enviadas y recibidas en intervalos de tiempo diferentes sobre el mismo canal [8].

La duplexación por división temporal tiene una gran ventaja en los casos en los que el sistema presenta una asimetría entre las tasas de transmisión del canal de subida y el canal de bajada. A medida que aumenta la demanda de datos en el canal de subida, se le puede asignar más capacidad a éste de forma dinámica, y si por el contrario el volumen de tráfico disminuye, se puede reducir la capacidad del enlace. El funcionamiento es el mismo para el canal de bajada.

2.2.1 TDD vs FDD

Una de las discusiones que se podrían tener a la hora del diseño de los sistemas 4G/5G del futuro es qué tipo de duplexación es el más adecuado teniendo en cuenta las características de las arquitecturas propuestas. Debido a la escasez de ancho de banda, y al gran incremento de terminales móviles que requieren un enlace radio, parece ser que un sistema de duplexación temporal es el más apropiado. Además TDD también presenta una serie de ventajas respecto a Frequency Division Duplexing (FDD):

- Para sistemas radio donde los terminales no se desplazan a grandes velocidades, los canales de subida y bajada son muy similares, esta característica se adecúa muy bien en sistemas TDD donde es explotada para el cálculo de matrices de *beamforming*.
- Solo la BS necesita tener el conocimiento de la información del canal para utilizar la transmisión coherente desde sus antenas.
- TDD y FDD tienen exactamente la misma capacidad, sin embargo, TDD suele permitir más flexibilidad en el proceso de asignación de recursos.

2.3 Reutilización frecuencial

La característica clave de las redes celulares es la reutilización de frecuencias con el fin de incrementar la capacidad del sistema. En teoría, las celdas adyacentes deben utilizar diferentes bandas espectrales para evitar problemas de interferencia co-canal entre sí. Sin embargo, si existe una distancia espacial apropiada entre las celdas, sí es posible operar en la misma banda frecuencial siempre controlando los niveles de potencia de la transmisión. Este funcionamiento en redes celulares tradicionales pretende ir un paso más allá en las futuras generaciones 4G/5G que implementen LSM o NM de tal manera que cada celda disponga de todo el ancho de banda del sistema, es decir, un factor de reutilización frecuencial igual a 1 donde se haga frente a la interferencia intercelular con la aplicación de técnicas como *beamforming*.

Los elementos que determinan la frecuencia de reutilización en la actualidad son la distancia de reutilización y el factor de reutilización. La distancia de reutilización se calcula como $D = R\sqrt{3N_c}$ donde R es el radio de la celda y N_c el número de celdas por clúster. Las celdas tienen radios que oscilan desde 1 hasta 30 kilómetros. En los límites de la celda, es donde los problemas debidos a la ICI (del inglés, Inter-carrier interference) son más preocupantes.

El factor de reutilización frecuencial expresa el ratio a partir del cual una banda frecuencial puede ser reutilizada en una red celular, dicho de otra manera, el número de celdas que conformarán un clúster (cada celda con su correspondiente repartición de espectro), donde cada clúster opera en la misma región frecuencial con todo el ancho de banda disponible y reparte entre sus celdas el espectro de la forma más inteligente posible con el fin de mitigar la interferencia co-canal (Fig. 2.1). En este TFG se utilizará la variable K_R para denotar el factor de reutilización

En caso de tener M antenas sectoriales en la misma BS, con diferentes direcciones cada antena, la BS puede servir N_S sectores diferentes. N_S es típicamente 3 (con ángulos de apertura de 120 grados). Esto implica que al ancho de banda destinado a una BS es dividido entre los diferentes sectores permitiendo disminuir la interferencia co-canal.

Si el ancho de banda del sistema es BW , cada celda dispone de $\frac{BW}{K_R}$ canales frecuenciales y, en caso de sectorización, se tendrían $\frac{BW}{N_S K_R}$ canales por sector.

2.4 Diversidad

El canal radio se caracteriza por presentar un comportamiento dinámico con desvanecimientos producto de los efectos de la propagación multicamino, los cuales pueden afectar negativamente al rendimiento del sistema. Con las técnicas de diversidad se puede evitar este deterioro con un pequeño aumento de la complejidad, que puede ser implementada tanto en transmisión como en recepción.

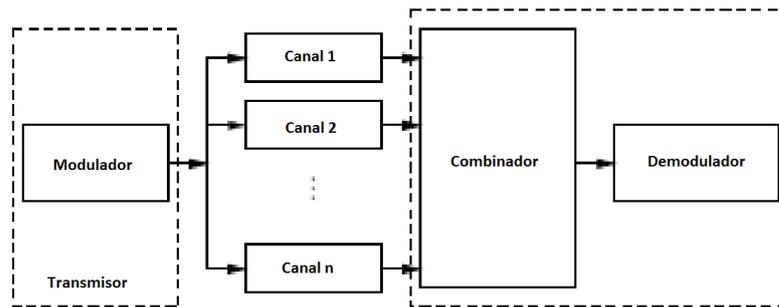


Figura 2.3: Esquema de un sistema con diversidad

Las técnicas de diversidad explotan la naturaleza aleatoria del canal radio para transmitir más de una versión de la señal original a través de múltiples canales, permitiendo en recepción obtener un conjunto de señales independientes. Tal y como se puede apreciar en la Fig. 2.3, la señal original es transmitida por distintos canales. Si los canales varían independientemente, la probabilidad de que la señal transmitida se vea afectada por un desvanecimiento profundo simultáneamente en todos ellos es baja. En entornos reales puede ser que los canales no sean totalmente independientes, sin embargo, un índice de correlación bajo bastaría para obtener una disminución de la SINR media necesaria para alcanzar una determinada probabilidad de *outage*. A esta disminución de SINR media se le denomina ganancia de diversidad. En teoría de la información, la probabilidad de *outage* se define como la probabilidad de que la tasa de transmisión en un instante t sea inferior a la mínima tasa de transmisión requerida por el sistema. Las diferentes réplicas recibidas de la señal transmitida son combinadas en recepción y enviadas a un circuito de demodulación y detección.

Existen múltiples tipos de diversidad, clasificados en función de diversos parámetros como: el extremo del sistema en que se implemente, el fenómeno físico explotado para lograr diferentes réplicas y en función de como se utilizan las diferentes réplicas. Este proyecto se centra en la diversidad espacial implementada en las BSs del sistema (equipo transmisor).

La diversidad espacial o de antena es lograda con la instalación de múltiples antenas en el lado del transmisor y/o receptor. Si las antenas se instalan suficientemente separadas entre sí, las señales sufrirán desvanecimientos casi independientes, y por tanto se obtienen caminos de señal diferenciados. La separación de antena requerida depende de la dispersión del entorno donde se encuentre la antena y de la frecuencia

de la portadora utilizada.

Como se ha comentado previamente, la diversidad espacial puede hallarse solo en transmisión, donde se encuentran los sistemas MISO (Multiple Input Simple Output), solo en recepción, donde se hallan los sistemas SIMO (Simple Input Multiple Output), o bien, tanto en recepción como en emisión en los sistemas MIMO tal y como se muestran en la Fig. 2.4. Esta última implementación es la más utilizada gracias a todas las ventajas que ofrece respecto a los otros modelos. Gracias a estas técnicas, los sistemas adquieren diferentes grados de libertad que pueden ser explotados de múltiples formas para el beneficio de la comunicación.

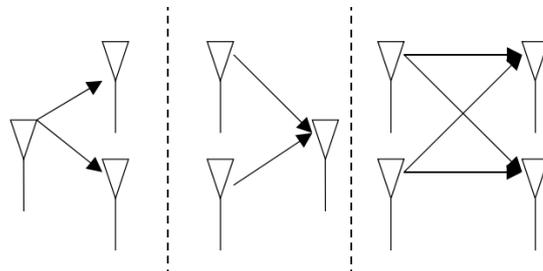


Figura 2.4: Ejemplo de modelo SIMO, MISO, MIMO respectivamente

2.5 Beamforming

El beamforming es una técnica de procesamiento espacial utilizada en *arrays* de antenas para direccionar las señales transmitidas [9], [10]. Esto se logra con la combinación de diferentes elementos dentro del *array* de antenas que permiten atribuir a las señales un ángulo de emisión concreto. Gracias a esta propiedad, los *arrays* de antenas son capaces de generar señales constructivas en una región muy concreta del espacio y que a su vez sean destructivas en otras ubicaciones. La mejora ofrecida por esta técnica en comparación con el uso de emisores/receptores omnidireccionales es conocida como directividad del *array* y será uno de los principales activos para definir la ganancia de las antenas del sistema.

Los sistemas diseñados para recibir señales procedentes de un conjunto de antenas, a menudo, encuentran la presencia de señales interferentes. Si la señal deseada y la interferente ocupan la misma banda temporal-frecuencial, el filtrado temporal no podrá separar la señal de la interferencia. Sin embargo, la señal deseada y la interferente, habitualmente, han sido originadas en diferentes localizaciones del espacio. Esta separación espacial puede ser explotada para separar la señal deseada de la interferente a través del filtrado espacial en recepción.

Para controlar la direccionalidad del *array* de antenas en transmisión (Fig. 2.5), un *beamformer* se encarga de controlar la fase y la amplitud relativa de la señal en cada transmisor, con el fin de crear un patrón de interferencia constructiva y destructiva en el frente de onda. En recepción, la información procedente de múltiples emisores (*array*

de antenas) se combina en función del patrón de radiación esperado y así obtener una señal útil.

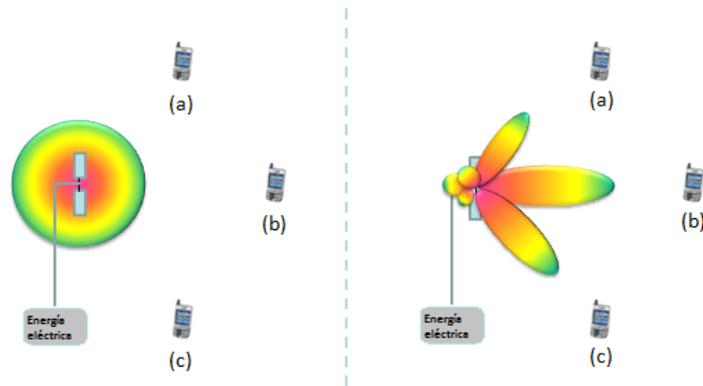


Figura 2.5: Modelo de radiación clásico vs *beamforming*

Beamforming juntamente con ZF será la técnica que permitirá mitigar la interferencia celular en LSM y NM. Al realizar un proceso de precodificación a la señal original que debe ser enviada se consigue que ésta no interfiera negativamente en otros usuarios de clúster. Para lograr este objetivo, una matriz ZF *beamforming* (\mathbf{W}), es calculada a partir de una serie de operaciones sobre la matriz de propagación que caracteriza de forma conjunta los canales de todos los usuarios que sirve la BS a través del proceso de *beamforming*. Por lo tanto, se puede deducir que el rendimiento de esta técnica está fuertemente ligado a un buen conocimiento del estado del canal por parte de la BS.

2.6 Zero-Forcing

Zero-Forcing es un método de precodificación utilizado para el procesamiento espacial de señales, a través del cual múltiples antenas transmisoras son capaces de anular la interferencia multiusuario en redes inalámbricas [11], como por ejemplo, la red celular que es estudiada en este proyecto.

En general, las técnicas de precodificación son técnicas donde la señal es perturbada/modificada de alguna forma y posteriormente codificada en el lado del transmisor. Los precodificadores lineales, crean diagramas de radiación que concentran la energía de forma direccional para cada usuario a través de la asignación de pesos a la fase y amplitud de las antenas.

Más concretamente, ZF es una técnica basada en *beamforming* donde se pretende, de forma sencilla, compensar la dispersión de amplitud y fase de todas las señales procedentes del *array* de antenas. Para conseguir estos resultados, se pueden añadir una serie de pesos a las diferentes señales de tal manera que con la elección de valores óptimos se obtenga una salida de señales que si se observa el dominio frecuencial su

suma ponderada dé cero. Si se dispone de una CSI perfecta, está demostrado que un precodificador ZF puede lograr rendimientos cercanos a los del límite teórico de la capacidad del sistema cuando el número de usuarios es elevado y en regímenes de operación con una SINR elevada. En contrapartida, el buen funcionamiento de esta técnica estará directamente ligado a la precisión de la información del estado del canal.

ZF implementa un filtro lineal justo antes de la salida de la señal, permitiendo forzar a cero la interferencia intersimbólica (ISI) del sistema. Para ello, realiza la pseudoinversa de una matriz no cuadrada como se observa en (2.3) y la multiplica por la señal de salida original obteniendo un conjunto de símbolos estimados definidos tal que $\mathbf{s} = \mathbf{W}\mathbf{y}$. Entre sus ventajas, destacan la sencillez de los receptores y el tratamiento de símbolos de forma independiente.

$$\mathbf{W} = \mathbf{G}^H(\mathbf{G}^H\mathbf{G})^{-1} \quad (2.3)$$

donde \mathbf{G} es la matriz de propagación que caracteriza de forma conjunta los canales de todos los usuarios que sirve la BS.

NETWORK MIMO

3.1 Principios básicos

Network MIMO o *Cooperative MIMO* [5], [4], [3], [12] es una tecnología que permite explotar de forma efectiva la dimensión espacial de los canales móviles con desvanecimientos para conseguir mejoras significativas de rendimiento en los sistemas de comunicación inalámbricos. A través de la emisión de señales desde múltiples antenas separadas adecuadamente entre sí, el sistema logra obtener un conjunto de señales que sufrirán desvanecimientos más o menos independientes. Esta incorrelación entre distintas señales ofrece al sistema receptor la posibilidad de explotar los diferentes grados de libertad (orden de diversidad) para mejorar las prestaciones del sistema.

En los sistemas MIMO convencionales, conocidos como *MIMO punto a punto* se requiere que ambos extremos de comunicación, es decir, emisor y receptor estén equipados con múltiples antenas (con las dificultades que ello conlleva en ciertos dispositivos móviles inalámbricos que no pueden soportar varias antenas debido a coste, precio, consumo de energía, ...). Además, la separación entre antenas en dispositivos móviles es insuficiente para lograr mejoras de ganancia destacables, en consecuencia, a medida que aumenta el número de antenas, el rendimiento de los sistemas clásicos de MIMO se aleja de las ganancias teóricas.

Network MIMO usa un conjunto de antenas distribuidas en diferentes BSs con el propósito de aproximarse al máximo a los valores teóricos de ganancia en sistemas MIMO. La principal idea que debe ser extraída en *Network MIMO* es que la transmisión se realiza a través de diferentes BSs que transmiten de manera conjunta y coordinada a diferentes usuarios de forma simultánea (Fig. 3.1).

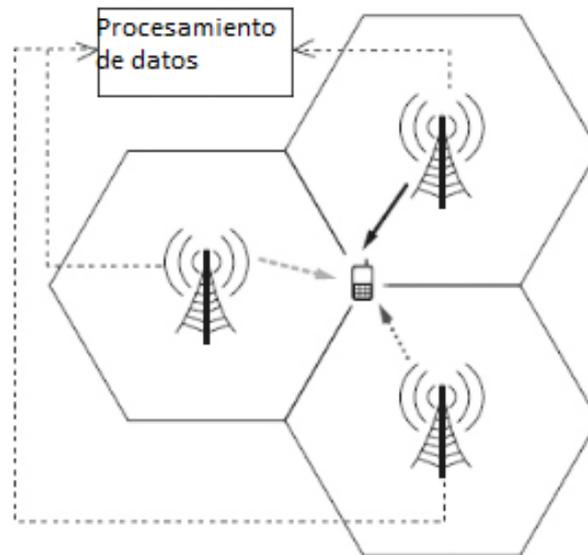


Figura 3.1: Esquema de transmisión del canal de bajada en *Network MIMO* para uno de los múltiples usuarios

Las desventajas de *Network MIMO* aparecen como consecuencia del aumento de la complejidad en los sistemas y la gran cantidad de información de señalización necesaria para llevar a cabo el proceso de cooperación entre los dispositivos. Las ventajas de *Network MIMO*, residen en: su potencial para mejorar la capacidad, rendimiento en los límites de la celda y gestionar de manera rentable la movilidad de un grupo de usuarios en redes inalámbricas.

3.2 Notas sobre Network MIMO

Antes de la irrupción de *Network MIMO* ya se habían propuesto técnicas de procesamiento conjunto entre las BSs con el fin de mitigar la interferencia intercelular. Buen ejemplo de ello es la diversidad cooperativa que permitía maximizar la capacidad total del sistema a través del uso de repetidores. Sin embargo, este método presentaba una eficiencia espectral muy pobre.

Las primeras implementaciones de *Network MIMO* en BSs fueron adoptadas en las especificaciones celulares de redes 4G y parecen tener una importancia significativa de cara a las futuras redes 5G. CoMP y conjuntos de repetidores fijos que realizan el procesado en banda base habilitan un despliegue denso, simple, económico de una serie de cabezales radio que pueden sustituir a las BSs. Sin embargo, la capacidad de los usuarios todavía resta limitada por la cantidad de espectro disponible, esto puede llegar a representar un problema debido al aumento constante de los datos consumidos por los usuarios. Como consecuencia, la reutilización frecuencial y la gestión que se realice de ésta se convertirá en un elemento fundamental de las nuevas generaciones.

La adopción de *Network* MIMO en los terminales móviles de los usuarios, utilizándolos como repetidores, permite distribuir las cargas de procesamiento entre todos los dispositivos clientes del clúster, lo cual implica que la carga computacional escala más efectivamente a medida que el número de usuarios del clúster aumenta. El objeto de este proyecto no se basa en el estudio de este tipo de arquitectura. Sin embargo, las características más destacadas serán comentadas para futuras líneas de investigación. Si bien es cierto, la comunicación para la coordinación entre usuarios puede implicar cierta sobrecarga en cuanto a información se refiere, existe la posibilidad de que los dispositivos de un mismo clúster compartan canales radio y subcanales espaciales a través de enlaces inalámbricos de corto alcance. Esto significa que a medida que el clúster aumenta de tamaño la cantidad de ancho de banda disponible por usuario también aumenta. A pesar del gran potencial que parece tener *Network* MIMO del lado de cliente, una infraestructura basada en usuarios es mucho más compleja, a la par que presenta una serie de dificultades técnicas adicionales.

Mientras que los repetidores pueden reducir la energía de las transmisiones en general, ésta es invertida en la circuitería electrónica necesaria para el aumento del procesamiento computacional. Varias técnicas han sido desarrolladas para gestionar la sincronización temporal así como la frecuencial, las cuáles parecen ser uno de los puntos críticos y retos del futuro en *Network* MIMO. Recientemente, las búsquedas también se están focalizando en el desarrollo eficiente de protocolos MAC.

3.3 Cooperative MIMO en sistemas celulares

Cooperative MIMO en el contexto de sistemas celulares móviles aparece mediante tres esquemas principales propuestos para las redes celulares como serían: transmisión multipunto coordinada (CoMP), repetidor fijo y repetidor móvil. Esta diversidad de esquemas pueden ser apreciada en la Figura 3.2 tal y como se detalla en [4]. De todas formas, debido al tema que ocupa este TFG se hará especial énfasis en el esquema *Cooperative MultiPoint* donde se detallará el funcionamiento del canal de bajada así como sus limitaciones y retos para el futuro.

3.3.1 CoMP

CoMP es una técnica que surge como producto de la necesidad de combatir la interferencia intercelular, además, permite mejorar la tasa de transmisión de los usuarios ubicados en los extremos de las celdas y la eficiencia espectral. La arquitectura del sistema se puede observar de manera muy simplificada en la Figura 3.2a. La idea es compartir los datos y la CSI entre las BSs vecinas para coordinar sus transmisiones en el canal de bajada y procesar conjuntamente la señal recibida en el canal de subida. Las técnicas CoMP pueden convertir interferencias intercelulares dañinas en señales útiles, dando lugar a una ganancia de potencia significativa y ganancias de diversidad que pueden ser explotadas. Todas estas ventajas se fundamentan en el uso de enlaces de alta velocidad entre las BSs para el intercambio de información (datos, información de control, información del estado del canal).

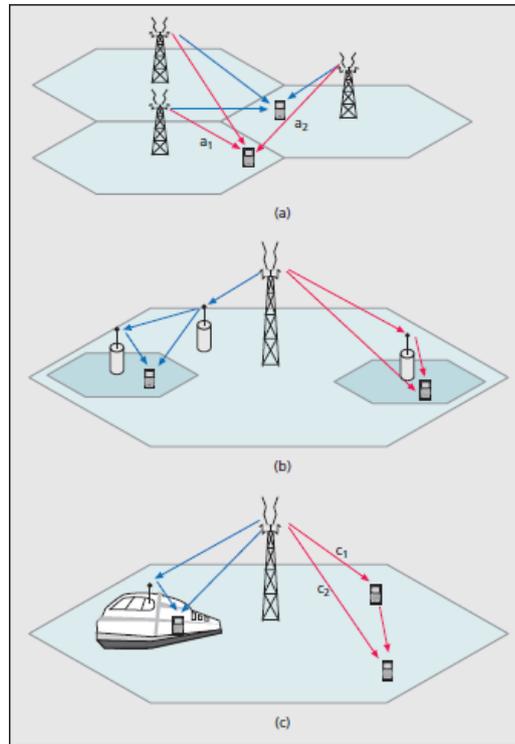


Figura 3.2: Tres tipos de cooperative MIMO en sistemas celulares: a) CoMP; b) repetidor fijo; c) repetidor móvil

Coordinated Multipoint o MIMO cooperativo es uno de los conceptos prometedores de cara a mejorar las tasas de transmisión de los usuarios en los límites de las celdas y sus correspondientes eficiencias espectrales evolucionando así los resultados obtenidos por MIMO-OFDM en las primeras versiones de LTE o WiMAX. Aunque CoMP coge protagonismo a partir de la *Release* 9 de LTE. No fue hasta la *Release* 11 donde surgieron los primeros conceptos haciendo referencia a CoMP y que han ido madurando para poder darle un uso comercial.

Una de las claves en redes móviles es la reutilización de los recursos a lo largo del espacio (como intervalos de tiempo o bandas frecuenciales) donde la intensidad de la señal se ve reducida como consecuencia de las pérdidas con la distancia, *shadowing* y desvanecimientos rápidos. Históricamente, esto ha mejorado utilizando planificadores de red que tenían ciertos patrones para la reutilización de frecuencias pero con el inconveniente de hacer un uso de recursos muy pobre. 3G y 4G son tecnologías que utilizan reutilización de frecuencia a nivel de celda lo que conlleva el problema de la interferencia entre celdas.

El término de coordinación de red aparece como una propuesta para combatir o mitigar la interferencia intercelular así como mejorar la eficiencia espectral. Los mismos recursos espectrales son utilizados en todos los sectores provocando interferencias a los diferentes terminales en los extremos de las celdas, donde la señal de múltiples BSs son recibidas con niveles de potencia similares en el canal de bajada. Varios sectores

de una BS pueden cooperar en un intradominio; si se habla de interdominio ya se está hablando de varias BSs que se encargan de proveer un servicio de forma conjunta.

Los sectores de un emplazamiento pueden ser unidades autosostenibles independientes, o diferentes cabeceras radio esparcidas en una región. Las diferentes BSs que se encuentran en la red deben estar interconectadas por una interfaz lógica X2. Físicamente, esta conexión puede ser de fibra óptica con grandes capacidades de transmisión.

CoMP puede ser aplicado tanto en el canal de subida como en el canal de bajada. Todos los esquemas implican aumentar la capacidad de la red de retorno (*backhaul links*), la complejidad, incrementar los requisitos de sincronización, mejorar estimación del canal y añadir cierta redundancia extra.

3.3.2 Modelos de canal

Para evaluar de forma precisa y comparar el rendimiento de diferentes tecnologías de transmisión en sistemas celulares Cooperative MIMO se requieren modelos de canal para Cooperative MIMO lo más realistas posibles. Las primeras investigaciones teóricas en Cooperative MIMO utilizaban simples modelos de canales de banda estrecha con desvanecimientos como los modelos Rayleigh, Rice o Nakagami. Estos modelos de canal presentaban demasiadas simplificaciones y resultaban ciertamente inapropiados para las simulaciones de rendimiento del sistema. A pesar de la existencia de modelos de canales MIMO estandarizados como el modelo de canal espacial (SCM), el modelo de canal *WINNER II* y el modelo de canal 802.16j; estos modelos estaban enfocados a simular canales punto a punto. En cambio en Cooperative MIMO se tienen múltiples enlaces punto a punto por lo que el canal no solo debe considerar propiedades de enlaces individuales sino que también debe valorar la heterogeneidad y la correlación de múltiples enlaces en un entorno multicelular.

A pesar de no tener un modelo de canal estándar para Cooperative MIMO, se tiene una base sólida sobre la cual se puede intentar construir un modelo que sea lo suficientemente razonable teniendo en cuenta los beneficios y desventajas que aportan uno u otro canal. En este ámbito, se destacan tres modelos :

- SCM, que es un modelo de canal celular para MIMO desarrollado por 3GPP para evaluar diferentes esquemas MIMO en HSDPA. Soporta una frecuencia central de 2 GHz y un ancho de banda de 5 MHz.
- WINNER 2 es un modelo diseñado por IST-WINNER II utilizado en modelos de canal inalámbricos. Soporta un frecuencia central de 2 a 6 GHz y un ancho de banda de 100 MHz.
- IEEE 802.16j se caracteriza por ser un modelo utilizado en sistemas WiMAX. Soporta una frecuencia central de 5 GHz y un ancho de banda máximo de 20 MHz.

3.3.3 CoMP en el canal de bajada

Las BSs cooperativas en el canal de bajada también pueden mejorar el rendimiento de las celdas, y lo que es más importante, el rendimiento en los límites de las celdas. Se distinguen 2 categorías CoMP en el canal de bajada:

1. Planificación/ *Beamforming* conjunto: los datos de usuarios solo están disponibles en un sector, la celda que le da servicio; pero las decisiones de planificación y *beamforming* se realizan de forma conjunta entre sectores.
2. Procesado conjunto CoMP: los datos de usuario están disponibles en múltiples sectores de la red. Una rama de esta categoría es la transmisión conjunta, donde múltiples sectores transmiten simultáneamente a un terminal.

Resultado de pruebas de campo

Beamforming cooperativo-coordinado multicelda ha sido probado en diversas simulaciones teniendo en cuenta los tiempos de latencia para la comunicación entre BSs. El método se basa en un índice de matrices de precodificación (PMIs): los terminales miden y envían PMIs de sus propias celdas y, adicionalmente, los PMIs de las celdas vecinas que causan mayor interferencia además de la información de la calidad del canal.

El planificador multicelda se base en una aproximación distribuida, con solapamiento de clústers constituidos por 7 celdas vecinas cada uno. La planificación se coordina dentro de los clústers. Las simulaciones realizadas en diversos entornos han demostrado que este sistema también aporta ganancias significativas en los extremos de las celdas donde la situación es más delicada debido a los niveles de interferencia.

La transmisión conjunta ha sido valorada como la técnica CoMP más desafiante desde el punto de vista de la implementación. Para verificar la dificultad de su implementación se realizaron una serie de pruebas y así se pudo comprobar cuan factible era la transmisión coherente intra e interzona en CoMP. Para una serie de escenarios con diferentes interferencias, los resultados fueron positivos al obtener ganancias significativas de rendimiento. Las mismas técnicas fueron evaluadas en otros sistemas más complejos a través de simulaciones (sin hacer pruebas en entornos reales). A la hora de considerar esta técnica hay una serie de requerimientos a tener en cuenta:

- Gran precisión de sincronización temporal y frecuencial.
- El uso de osciladores de frecuencias radio con ruido bajo de la fase.
- Señales de referencia específicas por celda.
- Retroalimentación del estado del canal con indicación temporal.
- Intercambio de información y CSI síncrono entre BSs a través de la interfaz X2.
- Precodificación distribuida y la provisión de pilotos precodificados.

Retos

Estudios recientes (p.e., [5]) demuestran que la complejidad que presenta el canal de bajada CoMP puede ser gestionado en escenarios del mundo real y que se pueden obtener ganancias considerables formando pequeños clústers cooperativos en redes de gran extensión. Sin embargo, hay ciertos problemas que requieren atención antes de implementar esta tecnología en el mundo real :

- Reducir el coste de la sincronización de las BSs y de los transmisores de bajo ruido de fase.
- Compresión eficiente de la información de retroalimentación.
- Reducir el retraso de la retroalimentación.
- Predicción eficiente del canal en el precodificador.
- Formación flexible de clústers cooperativos.
- Gestión de la interferencia externa dentro del clúster.
- Selección de múltiples usuarios eficiente.
- Integración de CoMP con redes superiores.

Clustering de celdas

Para poder explotar todas las mejoras que ofrece CoMP es necesario introducir cierta información extra de señalización en la interfaz inalámbrica y sobre la red de retorno (*backhaul*) para poder operar en régimen de cooperación interzona. Además, en la práctica solo un número limitado de BSs pueden cooperar debido al gran volumen de información que debe ser transportado para la coordinación (CSI + datos de los usuarios). Es necesario estimar bien el número de BSs de tal manera que la información extra añadida sea manejable y el cálculo del precodificador posible. Los clústers con celdas cooperativas deben ser configurados de forma adaptativa basándose en medidas frecuenciales en el canal radio y la posición de los usuarios para poder explotar las ventajas de CoMP eficientemente y con una complejidad limitada. Un requisito indispensable para cualquier algoritmo de clusterización adaptativo es que éste encaje en la arquitectura de la red, en referencia al acceso radio y al acceso al núcleo de la red.

Para valorar el rendimiento del algoritmo de *clustering* adaptativo [5], diversas simulaciones fueron realizadas siguiendo un modelo de distribución de celdas hexagonal. Tal y como se puede observar en la Figura 3.3, se encuentra un escenario con 19 zonas con 3 sectores por zona con una distancia entre ellas de 500 metros. Es apreciable como el modelo de clúster estático no ofrece ningún tipo de flexibilidad ante la movilidad de los usuarios de la red y la densidad que se pueda encontrar de éstos en diferentes regiones del espacio. Con la técnica de *clustering* adaptativo se dispone de una red dinámica que se ajusta a las necesidades del sistema en todo momento mediante la redefinición de los clústers (las celdas que compondrán estos clústers) durante ciertos intervalos temporales para brindar el mejor servicio posible al usuario. El modelo de

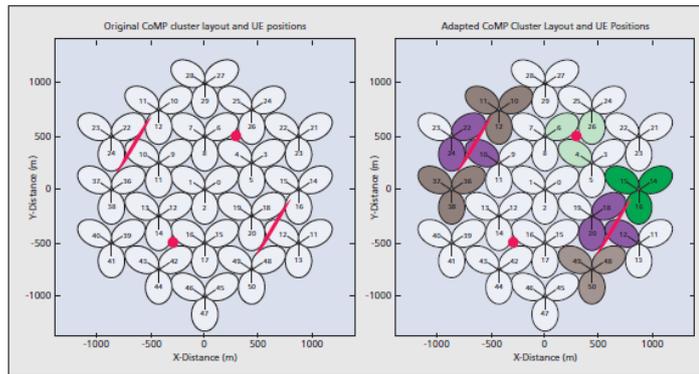


Figura 3.3: Clúster no adaptativo vs clúster adaptativo

canal SCM fue el elegido para la simulación. El *shadowing* supuesto fue de 2 dB. Se desplegaron 100 usuarios aleatorios a lo largo de todo el sistema. Así pues, este método propone crear clústers alrededor de los usuarios de forma dinámica en función de las necesidades que se presenten a tiempo real y deshabilitar zonas de servicio (evitar crear clústers) donde se produzca la escasez o inexistencia de usuarios en ese mismo instante. La ganancia aportada por esta técnica en comparación a la *Release 8* de LTE es de 6 dB.

3.3.4 Backhaul en CoMP

Arquitectura y tecnologías

Las enfoques que se le han dado a CoMP necesitan intercambiar directamente información entre celdas, con diferentes requerimientos de rendimiento y latencia en el *backhaul*. CoMP intrazona puede ser realizado sin prácticamente impacto en el *backhaul*. En caso de despliegues con unidades radio remotas conectadas a un centro de procesado en banda base a través de conexiones Ethernet o de fibra, los requisitos de *backhaul* siguen sin suponer un obstáculo.

Para la conectividad entre diferentes zonas, la interfaz lógica X2 debe ser utilizada. Puede ser un cable físico directamente conectado o un enlace multisalto, dependiendo de la arquitectura de la red. El retraso dependerá de la topología de la red, el retraso por procesamiento en los nodos y el retraso de línea. Con enlaces Gigabit Ethernet se han conseguido tasas de 10 Mb/s y retrasos de 0.1 a 20 μ s.

Requerimientos de latencia

CoMP tiene que ser integrado con el protocolo de repeticiones HARQ (Hybrid Automatic Repeat Request), así, la latencia de la red de retorno pone algunas limitaciones en CoMP y aconseja latencias máximas de 1 ms. Otro impacto crucial de la latencia del *backhaul* es el peligro que la información intercambiada sobre el canal quede obsoleta provocando una caída en picado del rendimiento del sistema.

Requisitos de capacidad

Los esquemas CoMP requieren intercambio de: información del estado del canal, datos de control, datos del usuario y de las señales recibidas en un formato preprocesado o cuantificado. Los requisitos de este enlace oscilan ampliamente desde algunos Mb/s hasta 4 Gb/s para diferentes estimaciones de CoMP. Lógicamente, también influye el tamaño del clúster.

3.4 Descripción Matemática

3.4.1 Notación

En este proyecto de N-MIMO se utilizará la siguiente notación: las matrices, los vectores columna, y los escalares serán representados por letras mayúsculas en negrita \mathbf{X} , letras minúsculas en negrita \mathbf{x} , y letras minúsculas sin negrita x , respectivamente. La matriz transpuesta y la matriz Hermítica serán, respectivamente, denotadas como $(\cdot)^T$ y $(\cdot)^H$. La matriz identidad $N \times N$ será representada por \mathbf{I}_N . Finalmente, una función de distribución Gaussiana compleja con media $\mathbf{0}$ y una matriz de covarianza \mathbf{X} es expresada como $\mathcal{CN}(\mathbf{0}, \mathbf{X})$

3.4.2 Modelo del sistema

A continuación se expone el modelo matemático de *Network* MIMO utilizado en la realización de este TFG. Cada clúster incluye B BSs cooperativas, cada una equipada con M antenas transmisoras y que dan servicio a K usuarios monoantena ($N = 1$). En cada instante temporal se da servicio a un total de $K_c = BK$ usuarios.

Se estudiará el sistema N-MIMO asumiendo diferentes grados de libertad (ζ) variando el número de antenas desplegadas en cada BS. Se define ζ como el número de canales independientes explotables para cada usuario. Se analizará el rendimiento del sistema para $\zeta = 1, 5, 9$. Para lograr el mismo número de grados de libertad por usuario en ambos sistemas, se realizará el estudio para $M = 5, 6, 7$ antenas transmisoras en cada BS de N-MIMO. Para conseguir el número de grados de libertad citados anteriormente en LSM se utilizarán $BM = 20, 24, 28$ antenas transmisoras respectivamente por BS. Los grados de libertad son calculados mediante la siguiente expresión:

$$\zeta = B(M - K) + 1 \quad (3.1)$$

donde B representa el número de BSs, M el número de antenas desplegadas en una celda N-MIMO y K el número de usuarios seleccionados por celda.

Se asume que las B estaciones cooperativas del clúster l de un sistema *Network* MIMO tienen un perfecto conocimiento del canal definido por:

$$\mathbf{G}_l = [\mathbf{g}_{1l}, \dots, \mathbf{g}_{K_c l}] \in \mathcal{C}^{BM \times K_c} \quad (3.2)$$

que simboliza la matriz de canal compuesta de todas las BSs hacia los usuarios dentro de un clúster. Donde:

$$\mathbf{g}_{il} = [\mathbf{g}_{i1l}^T, \dots, \mathbf{g}_{iBl}^T]^T \in \mathcal{C}^{BM} \quad (3.3)$$

indica el vector del canal compuesto entre las B BSs que ofrecen servicio y el usuario i . El canal entre la BS m del clúster j y el usuario i del clúster l será un vector denotado como:

$$\mathbf{g}_{ilmj} = \sqrt{\beta_{ilmj}} \mathbf{h}_{ilmj} \quad (3.4)$$

donde \mathbf{h}_{ilmj} define un canal Rayleigh con desvanecimientos a pequeña escala $\mathcal{CN}(0, 1)$ con sus componentes independientes e idénticamente distribuidas, y β_{ilmj} representa el coeficiente de pérdidas por la distancia. Se considera un modelo estándar de pérdidas:

$$\beta_{ilmj} = \kappa \cdot r_{ilmj}^{-\alpha} \quad (3.5)$$

donde r_{ilmj} expresa la distancia entre la BS m del clúster j y el usuario i del clúster l , α representa el exponente de pérdidas y κ simboliza las pérdidas por la distancia a un metro de la BS.

Tal y como se ha dicho previamente, ambas técnicas en este proyecto basan su proceso de mitigación de interferencia intercelular en la utilización de ZF *beamforming*. Para ello en los sistemas N-MIMO, las diferentes BSs cooperativas se envían su CSI a través del enlace de *backhaul* y calculan una matriz de *beamforming* a nivel de clúster. La matriz de ZF *beamforming* diseñada conjuntamente por las celdas cooperativas de un clúster se define en este proyecto como:

$$\tilde{\mathbf{W}}_l = \mathbf{G}_l (\mathbf{G}_l^H \mathbf{G}_l)^{-1} = [\tilde{\mathbf{w}}_{1l}, \dots, \tilde{\mathbf{w}}_{K_c l}] \quad (3.6)$$

donde $\tilde{\mathbf{w}}_{il} \in \mathcal{C}^{BM}$ es el filtro ZF destinado al usuario i . Además, este filtro ZF es normalizado $\mathbf{w}_{il} = \frac{\tilde{\mathbf{w}}_{il}}{\|\tilde{\mathbf{w}}_{il}\|}$ para conseguir asignaciones de potencia uniformes entre usuarios. Además, la señal recibida por el usuario i en el clúster l es una suma de todas las señales deseadas procedentes de la transmisión conjunta de un grupo de BSs, la interferencia entre clústers y el ruido recibido. Así pues, la señal recibida por el usuario i del clúster l se puede expresar como:

$$y_{il} = \sqrt{\frac{P_T}{K}} \mathbf{g}_{il}^H \mathbf{w}_{il} s_{il} + \sum_{j \neq l} \sum_{k=1}^{K_c} \sqrt{\frac{P_T}{K}} \mathbf{f}_{ilj}^H \mathbf{w}_{kj} s_{kj} + n_{il} \quad (3.7)$$

donde s_{il} es un escalar complejo que representa la señal de información para el usuario i en el clúster l con

$$\mathbb{E}[|s_{il}|^2] = 1 \quad (3.8)$$

y n_{il} denota el ruido aditivo blanco Gaussiano con media igual a cero y con varianza σ^2 .

Ahora queda por caracterizar la SINR que presentará N-MIMO. La SINR es definida como la relación entre la potencia de la señal de interés y la potencia resultante de la suma de todas las señales interferentes más el ruido. En nuestro caso, se define la potencia de la señal de interés tal que :

$$\rho |\mathbf{g}_{il}^H \mathbf{w}_{il}|^2 \quad (3.9)$$

donde ρ representa la SNR de un usuario i en un instante t como:

$$\rho = \frac{P_T}{K \sigma^2} \quad (3.10)$$

siendo P_T la potencia de transmisión de la BS, K el número de usuarios seleccionados por celda en cada instante t y σ^2 un factor de ruido.

A continuación, se encuentra en el denominador de la SINR la potencia de la suma de señales interferentes más la potencia de ruido ambiente:

$$\sum_{j \neq l} \sum_k \rho |\mathbf{f}_{ilj}^H \mathbf{w}_{kj}|^2 + 1 \quad (3.11)$$

se puede apreciar como se encuentra un doble sumatorio que simboliza la suma de todas las señales interferentes, el primer sumatorio hace alusión a todos los clúster del sistema a excepción del propio del usuario, mientras que el segundo sumatorio se refiere a los k usuarios que se encuentran en un clúster N-MIMO en un instante t . Finalmente se define:

$$\mathbf{f}_{ilj} = [\mathbf{g}_{il1j}^T, \dots, \mathbf{g}_{ilBj}^T]^T \quad (3.12)$$

como el canal de interferencia compuesto de las BSs del clúster j respecto el usuario i del clúster l .

Por lo tanto, la SINR del usuario i en el clúster l de un sistema *Network* MIMO viene dada por la fórmula:

$$\gamma_{il}^{NM,ZF} = \frac{\rho |\mathbf{g}_{il}^H \mathbf{w}_{il}|^2}{\sum_{j \neq l} \sum_k \rho |\mathbf{f}_{ilj}^H \mathbf{w}_{kj}|^2 + 1} \quad (3.13)$$

Con la SINR del sistema N-MIMO ($\gamma_{il}^{NM,ZF}$) se tiene la posibilidad de calcular la capacidad del clúster l (cantidad máxima de información que puede transportar dicho sistema de forma fiable) a partir del teorema de *Shannon*:

$$C_l = \sum_{\forall i} B \log_2(1 + \gamma_{il}^{NM,ZF}) \quad (3.14)$$

donde B representa el ancho de banda del sistema y $\gamma_{il}^{NM,ZF}$ haría alusión a la SINR de N-MIMO. Con este parámetro, los diseñadores serían capaces de diseñar las infraestructuras NM necesarias para las redes 4G/5G del futuro de manera óptima y eficiente.

LARGE-SCALE MIMO

A continuación se explica otra técnica de importancia significativa para la mitigación de interferencias intercelulares presentada en este TFG, el esquema LSM[1], [6], [2]. Large-Scale MIMO es una versión reducida de MIMO Masivo pero que sigue los mismos principios al desplegar un gran número de antenas en cada BS. Mientras MIMO Masivo propone el despliegue de varios cientos de antenas, *Large-Scale* MIMO presenta un esquema reducido con varias decenas de antenas, facilitando la simulación del proyecto, donde ya se puede observar los beneficios de este tipo de arquitectura.

4.1 Introducción y principios básicos

Las tecnologías de múltiples antenas (MIMO) constituyen un pilar fundamental para las comunicaciones inalámbricas y se han incorporado a diferentes estándares de banda ancha como LTE y Wi-Fi. Básicamente, cuanto mayor sea el número de antenas equipadas en emisión y/o recepción, mayor número de rutas habrá disponibles para las señales y mejor rendimiento se obtiene a nivel de tasa de transmisión y/o robustez del enlace. El precio a pagar es un incremento en la complejidad del *hardware* además del aumento de la complejidad y consumo de energía del procesado de señal en ambos extremos.

Los sistemas de MIMO Masivo pretenden usar una enorme cantidad de antenas destinadas a proporcionar servicio a todos los terminales activos y operando en un régimen TDD (Fig. 4.1). Las antenas extra de la BS ayudan a focalizar la energía en regiones muy concretas del espacio ofreciendo grandes mejoras en rendimiento y eficiencia energética. La idea fundamental de LSM es que utilizando un número muy elevado de antenas, los canales entre los diferentes usuarios se vuelven ortogonales. Otros de los principales beneficios de MIMO Masivo son: uso de componentes muy económicos con un consumo de potencia bajo, latencia reducida, simplificación de la capa de acceso al medio (MAC), y robustez ante ataques de *jamming* intencionado.

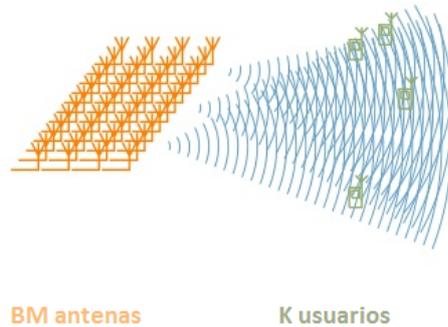


Figura 4.1: Configuración de un sistema MIMO Masivo

El rendimiento de esta topología dependerá del ambiente de propagación a través del cual los terminales serán provistos de canales asintóticamente ortogonales; diversos experimentos no han encontrado limitaciones en este aspecto.

En nuestro proyecto, cada BS utilizará BM antenas (B = número de BSs cooperativas por clúster, M = número de antenas desplegadas en cada celda N-MIMO) no solo para ofrecer servicio al conjunto de usuarios pertinentes; también para anular la interferencia provocada a otros usuarios dentro del clúster a través de ZF beamforming. Gracias al gran despliegue de antenas en cada celda, se consigue la mitigación de la interferencia intraclúster. En particular, con el conocimiento de la CSI de los usuarios dentro del clúster, cada BS explota su exceso de dimensiones espaciales no solo para servir a los múltiples usuarios asociados a través de un canal de bajada que utiliza *beamforming*, sino que también permite focalizar la transmisión con el fin de anular la interferencia causada a otros terminales del clúster.

4.2 Evolución de MU-MIMO a MIMO Masivo

4.2.1 MU-MIMO

El antecesor de la tecnología MIMO Masivo es Multi-User MIMO, este sistema confía en la utilización de múltiples antenas para transmitir simultáneamente múltiples flujos de datos en los sistemas de comunicaciones inalámbricos. Cuando MIMO es utilizado con el objetivo de comunicar varios terminales al mismo tiempo, se habla de MIMO multiusuario (MU-MIMO). MIMO está limitado por $\min\{M, N\}$, si los usuarios móviles tienen un número de antenas receptoras, N , bajas se tienen pocos canales disponibles, MU-MIMO compensa esta carencia seleccionando varios usuarios simultáneamente.

Multi-User MIMO (MU-MIMO) en sistemas celulares ofrece mejoras en 4 puntos:

- **Incremento de la tasa de transmisión**, al tener más antenas, más independencia se encuentran entre los flujos de datos emitidos y más terminales pueden ser servidos simultáneamente.

- **Más robusto**, ya que múltiples antenas conllevan la aparición de más rutas, a través de las cuales, las señales radio pueden ser propagadas.
- **Mejora de eficiencia energética**, porque la BS es capaz de focalizar la energía emitida hacia una ubicación conocida de los terminales.
- **Reducción de interferencias**, como consecuencia directa del punto anterior, al ser capaces de evitar transmisiones en zonas donde la propagación de interferencias puede ser dañina para otras zonas de la red.

Sin embargo, todas estas mejoras no pueden ser logradas simultáneamente, y hay ciertos requerimientos en las condiciones de propagación. La tecnología MU-MIMO ha ido madurando en las comunicaciones inalámbricas y se ha incorporado en diferentes estándares como 4G LTE, LTE-Avanzado (LTE-A), LTE-Avanzado Pro y IEEE 802.11ac. Cuantas más antenas sean ubicadas en la BS (o terminales), mejor rendimiento ofrece este sistema en los 4 puntos citados anteriormente, al menos operando en modo TDD. De todas formas, el número de antenas utilizado en la actualidad es todavía modesto. LTE, permite hasta 8 antenas en la BS, mientras que la *Release* 13 de LTE-Avanzado PRO extiende el número a un total de 16 transceptores y la *Release* 14 lleva el número a un máximo de 64. Independientemente de los estándares, los equipamientos que están siendo construidos hoy en día, presentan un número de antenas bastante inferior a los citados anteriormente. Para poner solución a estos despliegues tan modestos, surge una nueva técnica que pretende revolucionar el mundo de las telecomunicaciones móviles: MIMO Masivo.

4.2.2 MIMO Masivo

MIMO Masivo es una tecnología emergente, que escala la potencia ofrecida por MIMO en varios órdenes de magnitud respecto a los modelos actuales. MIMO Masivo es un sistema que utiliza un *array* de antenas con varios centenares de éstas para proveer un servicio simultáneo a varias decenas de terminales en el mismo recurso frecuencial-temporal. La premisa básica detrás de MIMO Masivo es recoger todos los beneficios del MIMO convencional, pero llevarlo a gran escala. Esto habilitará la existencia de infraestructuras capaces de soportar las demandas de la futura sociedad digital que se avecina con tecnologías como : *Internet of things*, *Internet of people*, nubes, y otras infraestructuras de red. Existen diversas configuraciones y escenarios para los *arrays* de antenas actuales utilizados por MIMO Masivo como se puede ver en la Fig. 4.2. Cada antena debería ser de pequeñas dimensiones.

MIMO Masivo confía en la multiplexación espacial que a su vez requiere que la BS tenga un conocimiento del canal suficientemente bueno tanto del canal de bajada como del de subida. En el canal de subida es fácil conseguir esta condición haciendo que los terminales envíen pilotos, basados en los cuales la BS estima la respuesta del canal de cada uno de los terminales. El canal de bajada es más complicado. En los sistemas MIMO convencionales, como el estándar LTE, la BS envía frentes de onda piloto a partir de los cuales los terminales estiman la respuesta del canal. Esta técnica no es factible en sistemas MIMO Masivo, al menos no cuando se opera en un entorno de alta movilidad, por dos razones. En primer lugar, los pilotos óptimos del canal de bajada

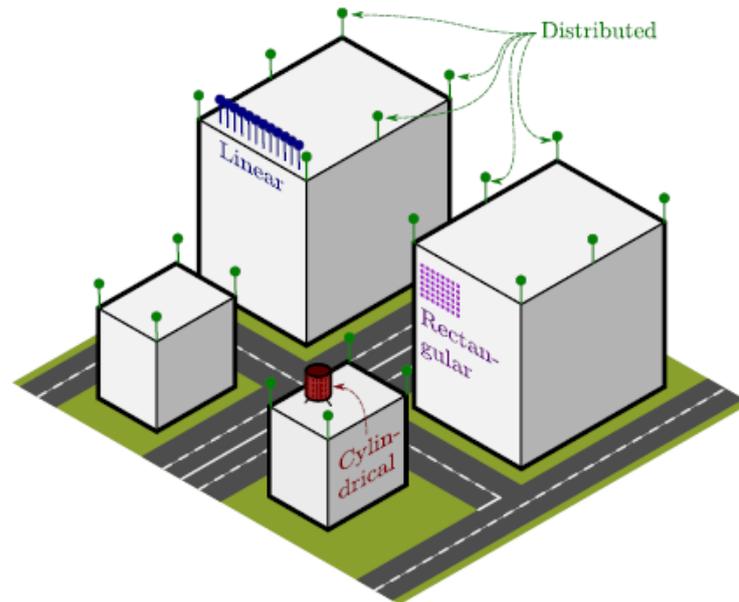


Figura 4.2: Algunas configuraciones de antenas posibles y escenarios para una estación de MIMO Masivo

deben ser ortogonales mutuamente entre las antenas. Esto significa que la cantidad de recursos frecuenciales-temporales que serían necesarios para los pilotos del canal de bajada escala con el número de antenas, por lo tanto, en un sistema MIMO Masivo se necesitarían varios centenares de recursos más que en un sistema convencional. En segundo lugar, el número de respuestas del canal que cada terminal debe estimar es también proporcional al número de antenas de la BS. Así pues, los recursos del canal de subida necesarios para informar a la BSs sobre las respuestas del canal deberían ser centenares de veces superior al de los sistemas convencionales. Generalmente, la solución es operar en modo TDD y confiar en la reciprocidad del canal entre el canal de subida y el canal de bajada, de modo que el canal en una dirección es estimable a partir del conocimiento del canal en la otra dirección.

4.3 Potencial de MIMO Masivo

La tecnología MIMO Masivo se basa en la coherencia de fase de las señales así como en un procesamiento de señales muy simple en las BSs para todas sus antenas. Algunas de las ventajas que ofrecen los sistemas MIMO Masivo son :

4.3.1 Incremento de la capacidad

MIMO Masivo puede incrementar la capacidad hasta 10 veces o más y simultáneamente mejorar la eficiencia de energía radiada en un factor 100. El incremento de capacidad surge de la multiplexación espacial tan agresiva utilizada en MIMO Masivo. El principio

fundamental que habilita el aumento en varios órdenes de magnitud de la eficiencia energética es que, con un gran número de antenas, la energía puede ser focalizada con extrema precisión en pequeñas regiones del espacio. Con la correcta organización de las señales enviadas por las antenas, las BSs pueden asegurar que todos los frentes de onda emitidos se comporten de forma constructiva en las localizaciones de los terminales deseados, pero destructivamente en prácticamente cualquier otro lugar. La interferencia entre terminales puede ser suprimida si se utilizan técnicas como zero-forcing (ZF).

Una técnica alternativa a ZF sería la utilización de *maximum-ratio transmission* (MRT) en transmisión que permitiría simplificar el proceso computacional, al multiplicar las señales transmitidas por la respuesta conjugada del canal, además de poder implementarse de manera distribuida. Sin embargo, para sistemas convencionales MIMO con un tamaño de sistema moderado, ZF presenta mejor rendimiento que MRT. Esto se produce porque MRT funciona especialmente bien en sistemas de MIMO Masivo donde las respuestas asociadas a los diferentes terminales tienden a ser ortogonales cuando el número de antenas en la BS es elevado.

4.3.2 Componentes económicos de bajo consumo

MIMO Masivo es una tecnología que pretende cambiar las reglas establecidas hasta la actualidad a nivel de teoría, sistemas e implementación. Con MIMO Masivo, los caros amplificadores ultralíneales de 50W utilizados en los sistemas convencionales pueden ser reemplazados por cientos de amplificadores mucho más asequibles con una potencia de salida del orden de mW. El beneficio obtenido con este diseño respecto al clásico *array* de antenas alimentadas con amplificadores de alta potencia es más que notable. Otros elementos costosos y pesados como grandes cables coaxiales, pueden ser eliminados.

MIMO Masivo reduce las limitaciones de los amplificadores y cadenas RF en términos de precisión y linealidad. Todo lo que importa es su acción combinada. De cierta manera, MIMO Masivo confía en la *ley de los grandes números* para asegurarse que el ruido, los desvanecimientos y las imperfecciones de *hardware* son promediadas cuando las señales procedentes de un gran número de antenas se combinan en el aire. La misma propiedad que hace a MIMO Masivo resistente contra los desvanecimientos también la convierte en una tecnología extremadamente robusta contra el fallo de una o un conjunto de antenas.

Un sistema MIMO Masivo dispone típicamente de un excedente de grados de libertad. Por ejemplo, si se tienen 200 antenas sirviendo a 20 terminales, se poseen un total de 180 grados de libertad para explotar. Estos grados de libertad se pueden utilizar para organizar las señales de forma beneficiosa y luchar contra diversos tipos de interferencia. En particular, cada antena puede transmitir señales con un relación pico-promedio muy baja (con una pequeña penalización en términos de potencia irradiada) que facilitan el uso de amplificadores extremadamente baratos y muy eficientes

en términos de potencia.

La gran mejora obtenida en términos de eficiencia energética permite a los sistemas MIMO Masivo operar con un potencia total de salida de sus cadenas RF dos órdenes de magnitud inferiores respecto a la tecnología actual. Esto es relevante pues el consumo de energía en las BSs celulares es un preocupación latente en todo el mundo. Además, las BSs que consumen varios órdenes de magnitud menos de potencia pueden ser alimentadas a través de energías renovables (eólica, fotovoltaica, ...) permitiendo hacer despliegues de red en lugares con difícil acceso para las infraestructuras eléctricas. Finalmente, los niveles de exposición electromagnética también descenderían al disminuir la cantidad de potencia emitida y al reducir la cantidad de interferencia electromagnética generada por la BS.

4.3.3 Reducción de latencia

El rendimiento de los sistemas de comunicaciones inalámbricas normalmente se ve limitado por los desvanecimientos. Estos fenómenos pueden provocar que la intensidad de la señal recibida sea muy débil en ciertas ocasiones. Esto ocurre cuando la señal enviada por una BS se propaga a través de múltiples rutas antes de llegar al terminal y las ondas resultantes de las múltiples rutas interfieren destructivamente. Es este proceso el que complica la construcción de enlaces inalámbricos con baja latencia. Si el terminal se encuentra en una zona con un nivel de desvanecimiento elevado, tendrá que esperar que el canal de propagación sufra suficientes cambios hasta que una señal útil pueda ser recibida por el terminal. MIMO Masivo confía en la *ley de los grandes números* y en el *beamforming* para poder evitar zonas con un grado de desvanecimientos tan elevado y, por lo tanto, que el desvanecimiento de la señal no se convierta en una limitación para la latencia.

4.3.4 Simplificación del acceso a capa MAC

Debido a la *ley de los grandes números*, el canal gana en robustez y fiabilidad de tal manera que el *scheduling* en el dominio frecuencial ya no es necesaria. Con OFDM, cada subportadora de un sistema MIMO Masivo tendrá la misma ganancia de canal. Cada terminal puede recibir todo el ancho de banda del sistema, la cual cosa implica que la mayoría de la señalización de control de la capa física sea redundante.

4.3.5 Incremento de la robustez contra interferencias

El *jamming* intencionado contra sistemas inalámbricos de la población es un problema creciente y una seria amenaza para la ciberseguridad que parece ser conocida por una pequeña parte de la sociedad. *Jammers* simples pueden ser comprados en Internet por varios cientos de euros. Numerosos incidentes, especialmente los surgidos en las aplicaciones de seguridad pública, ilustran la magnitud del problema.

Debido a la escasez del ancho de banda, la difusión de la información sobre la frecuencia no es factible, por lo tanto, la única manera de mejorar la robustez de las

comunicaciones inalámbricas es el uso de múltiples antenas. MIMO Masivo ofrece grados de libertad excedentes que pueden ser utilizados para cancelar las señales interferentes intencionadas de diversos *jammers*. Si MIMO Masivo es implementado con la utilización de pilotos para la estimación del canal de subida, *jammers* inteligentes serían capaces de provocar interferencias perjudiciales con transmisiones modestas de potencia. Sin embargo, implementaciones más complejas utilizando estimación conjunta del canal y decodificación deberían minimizar este problema.

4.4 Descripción Matemática

4.4.1 Modelo del sistema

A continuación se expone el modelo matemático de MIMO Masivo utilizado en la realización de este TFG. Cada clúster incluye B BSs cooperativas, cada una equipada con BM antenas transmisoras y que dan servicio a K usuarios monoantena. En cada instante temporal se da servicio a un total de $K_c = BK$ usuarios.

Se estudiará el sistema LSM asumiendo diferentes grados de libertad (ζ) variando el número de antenas desplegadas en cada BS. Se analizará el rendimiento del sistema para $\zeta = 1, 5, 9$. Para conseguir el número de grados de libertad citados anteriormente en LSM se utilizarán $BM = 20, 24, 28$ antenas transmisoras respectivamente por BS. Los grados de libertad son calculados mediante la siguiente expresión:

$$\zeta = B(M - K) + 1 \quad (4.1)$$

donde B representa el número de BSs, M el número de antenas desplegadas en una celda N-MIMO y K el número de usuarios seleccionados por celda.

Cada usuario i es gestionado por una BS b perteneciente al clúster l . Se asume que esta BS tiene un perfecto conocimiento de

$$\mathbf{G}_{bl} = [\mathbf{g}_{1lbl}, \dots, \mathbf{g}_{K_c lbl}] \in \mathcal{C}^{BM \times K_c} \quad (4.2)$$

que simboliza la matriz de canal compuesta de todas las BSs hacia los usuarios dentro de un clúster. Aquí:

$$\mathbf{g}_{ilbl} = \sqrt{\beta_{ilmj}} \mathbf{h}_{ilmj} \quad (4.3)$$

indica el canal entre la BS b del clúster l y el usuario i del clúster l . Además \mathbf{h}_{ilmj} define un canal Rayleigh con desvanecimientos a pequeña escala $\mathcal{CN}(0, 1)$ con sus componentes independientes e idénticamente distribuidas, y β_{ilmj} representa el coeficiente de pérdidas por la distancia. Se considera un modelo estándar de pérdidas

$$\beta_{ilmj} = \kappa \cdot r_{ilmj}^{-\alpha} \quad (4.4)$$

donde r_{ilmj} expresa la distancia entre la BS m del clúster j y el usuario i del clúster l , α representa el exponente de pérdidas y κ simboliza las pérdidas por la distancia a un metro de la BS.

Tal y como se ha comentado en NM, ambas técnicas en este proyecto basan su proceso de mitigación de interferencia intercelular en la utilización de ZF *beamforming*. Para ello en los sistemas LSM, las diferentes BSs cooperativas estiman el CSI respecto a todos los usuarios y calculan una matriz de *beamforming* a nivel de celda dentro del clúster teniendo en cuenta que las distintas BSs del clúster tienen que informarse de qué usuarios han seleccionado en cada BS. Para conseguir la multiplexación espacial de los K usuarios, mientras se suprime la interferencia provocada a los otros terminales, la BS b diseña su matriz de ZF *beamforming* para el canal de bajada tal que:

$$\tilde{\mathbf{W}}_{bl} = [\mathbf{G}_{bl}(\mathbf{G}_{bl}^H \mathbf{G}_{bl})^{-1}]_{1:K} = [\tilde{\mathbf{w}}_{1bl}, \dots, \tilde{\mathbf{w}}_{Kbl}] \quad (4.5)$$

donde $\tilde{\mathbf{w}}_{ibl} \in \mathcal{C}^{BM}$ es el filtro ZF asignado al usuario i , y $[\cdot]_{1:K}$ selecciona las K columnas correspondientes a los K usuarios gestionados por la BS b . Además, este filtro es normalizado $\mathbf{w}_{ibl} = \frac{\tilde{\mathbf{w}}_{ibl}}{\|\tilde{\mathbf{w}}_{ibl}\|}$ para conseguir asignaciones de potencia uniformes a los diferentes usuarios.

La señal recibida por el usuario i en el clúster l es una suma de todas las señales deseadas procedentes de la BS b , la interferencia entre clústers y el ruido recibido. Así pues, la señal recibida por el usuario i de la celda b del clúster l se puede expresar como:

$$y_{ibl} = \sqrt{\frac{P_T}{K}} \mathbf{g}_{ilbl}^H \mathbf{w}_{ibl} s_{ibl} + \sum_{j \neq l} \sum_{m=1}^B \sum_{k=1}^K \sqrt{\frac{P_T}{K}} \mathbf{f}_{ilmj}^H \mathbf{w}_{kmj} s_{kmj} + n_{ibl} \quad (4.6)$$

donde s_{il} es un escalar complejo generado conforme a una modulación discreta (p.e., MQAM) que representa la señal de información para el usuario i en el intervalo de tiempo t con potencia media unitaria, es decir:

$$\mathbb{E}[|s_{ibl}|^2] = 1 \quad (4.7)$$

y n_{ibl} denota una muestra de ruido aditivo blanco Gaussiano de media cero y varianza σ^2 .

Siguiendo el modelo matemático del esquema NM, ahora se caracterizará la SINR presentada por LSM. Teniendo en cuenta la definición de SINR descrita en el capítulo de *Network MIMO*, se define la potencia de la señal de interés en un sistema LS-MIMO tal que:

$$\rho |\mathbf{g}_{ilbl}^H \mathbf{w}_{ibl}|^2 \quad (4.8)$$

en esta ocasión, los diferentes factores de la expresión 4.8 tienen como subíndice adicional la BS que está proporcionado el servicio al cliente (b) a diferencia de NM, ya que NM se centra en un concepto de clúster y LSM ofrece servicio a través de una única BS.

A continuación, se encuentra en el denominador de la SINR la potencia de la suma de señales interferentes más la potencia de ruido ambiente:

$$\sum_{j \neq l} \sum_m \sum_k \rho |\mathbf{f}_{ilmj}^H \mathbf{w}_{kmj}|^2 + 1 \quad (4.9)$$

se puede apreciar que en esta ocasión aparece un tercer sumatorio haciendo referencia a la BS del usuario interferente. Nuevamente, se indica a que BS pertenece cada usuario con el subíndice b a diferencia de NM. El hecho de tener más sumatorios no implica tener más señales interferentes ya que en NM la k del sumatorio tiene un rango de valores de uno a veinte cubriendo todos los usuarios del clúster y en LSM la k tiene un rango de valores de uno a cinco que al multiplicarse por las cuatro BSs se obtienen los veinte usuarios del clúster.

Por lo tanto, la SINR del usuario i en el clúster l de un sistema *Large Scale MIMO* viene dada por la fórmula:

$$\gamma_{ibl}^{LSM,ZF} = \frac{\rho |\mathbf{g}_{ilbl}^H \mathbf{w}_{ibl}|^2}{\sum_{j \neq l} \sum_m \sum_k \rho |\mathbf{f}_{ilmj}^H \mathbf{w}_{kmj}|^2 + 1} \quad (4.10)$$

Con la SINR del sistema LSM ($\gamma_{ibl}^{LSM,ZF}$) se tiene la posibilidad de calcular la capacidad del clúster l (cantidad máxima de información que puede transportar dicho sistema de forma fiable) a partir del teorema de *Shannon*:

$$C_l = \sum_{\forall b} \sum_{\forall i} \gamma_{ibl}^{LSM,ZF} \quad (4.11)$$

con este parámetro, los diseñadores serían capaces de diseñar las infraestructuras LSM para las redes 4G/5G del futuro de manera óptima y eficiente.

RESULTADOS

A continuación se analizarán los diferentes resultados obtenidos durante la realización de este TFG sobre dos de las técnicas de mitigación de interferencia intercelular que se postulan a ser las elegidas en las redes celulares del futuro. En primer lugar nuestra atención será fijada en un usuario concreto que se colocará en dos zonas clave dentro de la celda: la primera ubicación será el centro del clúster donde la cooperación de BSs debería mitigar los grandes niveles de interferencia y en una zona muy próxima a la BS de la celda donde el nivel de potencia recibido por el usuario es mucho mayor. Posteriormente, se llevará a cabo un estudio a nivel de celda estudiando la variación en la intensidad de potencia, interferencia y valores de SINR en función de la distancia respecto del centro del clúster.

Para la realización de estas simulaciones se han utilizado el programa *Matlab* debido a su entorno de escritorio adaptado para flujos de trabajos científicos e ingenieriles, su rapidez computacional con librerías optimizadas, el uso de código compilado y la fiabilidad que lo avala. Con esta herramienta se han elaborado distintas gráficas que ayudarán a entender e ilustrar los resultados obtenidos durante el proceso de este TFG. Se optará por comparar LS-MIMO y N-MIMO en función para los diferentes parámetros del estudio y así poder valorar las mejoras reales que ofrece una técnica con respecto a la otra.

5.1 Descripción del entorno

En estas simulaciones se considerará una red celular multicelda multiusuario que comprende un conjunto de C clústers cooperativos constituidos por un grupo de BSs formando una estructura cuadrada. Cada una de las BSs se sitúa en el centro de cada cuadrado. Cada clúster incluirá B BSs, cada una equipada con múltiples antenas y que proveerá servicio a K usuarios dentro de la celda. En cada instante temporal $K_c = BK$ usuarios dispondrán de servicio en el clúster. Las BSs estarán limitadas a un máximo

5. RESULTADOS

de potencia P_T y transmitirán simultáneamente sobre un espectro compartido con un ancho de banda W con reutilización frecuencial universal. El canal entre la BS m del clúster j y el usuario i del clúster l será un vector denotado como $\sqrt{\beta_{ilmj}}\mathbf{h}_{ilmj}$, donde \mathbf{h}_{ilmj} define un canal Rayleigh con desvanecimientos a pequeña escala $\mathcal{CN}(0, 1)$ con sus componentes independientes e idénticamente distribuidas, y β_{ilmj} representa el coeficiente de pérdidas por la distancia. Se considera un modelo estándar de pérdidas $\beta_{ilmj} = \kappa \cdot r_{ilmj}^{-\alpha}$ donde r_{ilmj} expresa la distancia entre la BS m del clúster j y el usuario i del clúster l , α representa el exponente de pérdidas y κ simboliza las pérdidas por la distancia a un metro. Además se asume una estimación de canal perfecta en el receptor y la disponibilidad de CSI ideal en el transmisor. Para que el análisis sea más sencillo, se impondrán una serie de suposiciones :

1. ZF *beamforming* es utilizado en este proyecto. Aunque, en general, sea una técnica subóptima, ZF *beamforming* logra los mismos resultados que otras técnicas no lineales cuando el número de usuarios aumenta en un régimen de SINR altas, y su complejidad es significativamente inferior.
2. Los filtros ZF diseñados en cada clúster generalmente no son ortogonales. Sin embargo, para caracterizar las distribuciones de la potencia de la interferencia en las dos arquitecturas se tratarán los filtros ZF como vectores ortogonales.
3. Se asume que cada clúster está sujeto a una limitación de potencia. Aunque una limitación de potencia para cada BS es más práctico, ésta conlleva un aumento de complejidad computacional. Y además, se ha demostrado que esta suposición no implica una gran variación respecto del caso de una restricción por BS.
4. Además, la potencia total de cada clúster es distribuida equitativamente entre los diferentes filtros ZF del canal de bajada. Aunque la optimización de potencia puede mejorar el rendimiento del sistema, también implica un aumento considerable de coordinación intra e interclúster.
5. Finalmente, se ha supuesto una política de selección de usuarios basada en *round-robin*. Como consecuencia, ambos esquemas de coordinación sirven el mismo conjunto $K_c = BK$ de usuarios en cada instante temporal.

Como se ha comentado previamente, la topología presentará una forma cuadrada (*de rejilla*), tal y como se muestra en la Fig. 5.1, y se particulariza con los siguientes valores:

Número de clústers	$C = 9$
Número de BSs cooperativas por clúster	$B = 4$
Número total de usuarios por celda	$K_t = 60$
Número de usuarios seleccionado por celda	$K = 5$
Ancho de banda	$W = 20\text{MHz}$
Potencia máxima disponible de la BS	43 dBm
Longitud del lado del clúster	$L = 1000\text{m}$
Exponente de pérdidas	$\alpha = 3.5$
Ruido de fondo	$N_o = -174\text{dBm/Hz}$

Tabla 5.1: Parámetros para el diseño de la red.

Finalmente, se estudia el sistema asumiendo diferentes grados de libertad variando el número de antenas desplegadas en cada BS. Para lograr el mismo número de grados de libertad por usuario, se realiza el estudio para $M = 5,6,7$ antenas transmisoras en cada BS de Network MIMO y para $BM = 20,24,28$ antenas transmisoras en cada BS de MIMO Masivo. Los grados de libertad son calculados con la siguiente expresión:

$$\zeta = B(M - K) + 1, \quad (5.1)$$

donde B representa el número de BSs, M el número de antenas desplegadas en una celda NM y K el número de usuarios seleccionados por celda.

5.2 Potencia de señal deseada

Como se ha citado previamente, el primer análisis que se realizará será a nivel individual dentro del clúster para dos usuarios concretos tal y como se puede apreciar en la Fig. 5.1. Las ubicaciones de los usuarios serían (1515m,1515m) y (1735m,1735m). El primer usuario se encontraría en un espacio prácticamente equidistante respecto de las cuatro BSs y el segundo usuario está ubicado en una zona muy próxima a una de las BS.

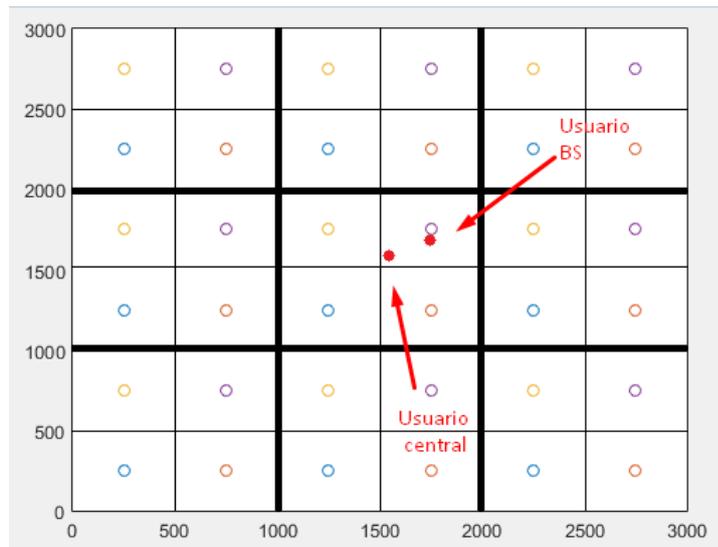


Figura 5.1: Simple esquema de la topología de red utilizada para las simulaciones. Se observan 9 clústers constituidos por 4 celdas cada uno, y cada celda equipada con una BS representada como un círculo. Los círculos rojos representan las ubicaciones de los usuarios estudiados en el proyecto.

Para la comparación en cuanto a rendimiento de N-MIMO y LS-MIMO en términos de potencia de señal deseada, se utilizará la CCDF (Complementary Cumulative Distribution Function). La CCDF de una variable aleatoria real (potencia de señal deseada) es la probabilidad de que esta variable tome valores superiores respecto un cierto valor x . Como se observa en la Fig. 5.2 LS-MIMO presenta mejor rendimiento en ambas ubicaciones respecto N-MIMO (Fig. 5.3). Aunque para el usuario localizado en la zona central del clúster la mejora no es excesivamente notoria, para un usuario que

5. RESULTADOS

se encuentra próximo a una de las BS la diferencia es del orden de 5 a 10 dB. Esto es provocado por la disparidad de distancias que las señales deben recorrer hasta llegar al usuario en los diferentes sistemas. Mientras que en LS-MIMO, las 20 antenas encargadas de dar servicio al usuario se encuentran en una única BS (la encargada de dar servicio a ese usuario), en los sistemas NM se encuentran estas antenas dispersas entre el conjunto de BSs del clúster y, como consecuencia, las señales enviadas por las BS a otras celdas que no sean la suya propia son estadísticamente más débiles (deben recorrer mayor distancia) y el usuario final notará esta condición con una disminución de la intensidad recibida. Para dar mayor profundidad al análisis, se aumenta el número de grados de libertad y se observa su impacto en estas tecnologías en el siguiente apartado.

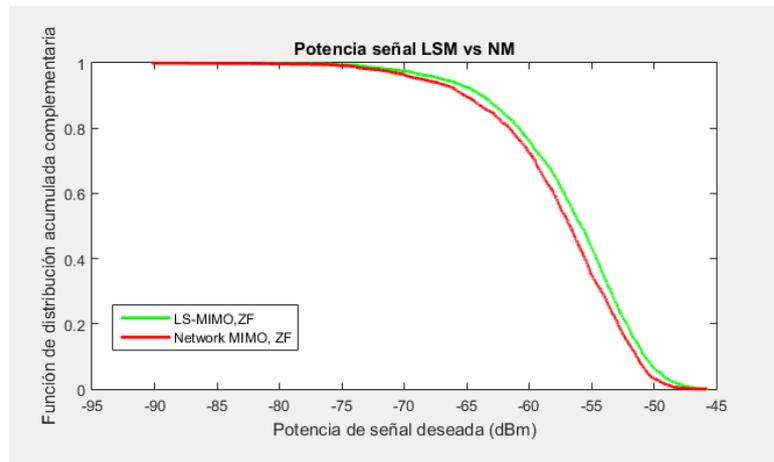


Figura 5.2: Potencia de señal deseada del usuario ubicado en (1515m,1515m) los sistemas LS-MIMO y N-MIMO. Teniendo en cuenta que $\zeta = 1$.

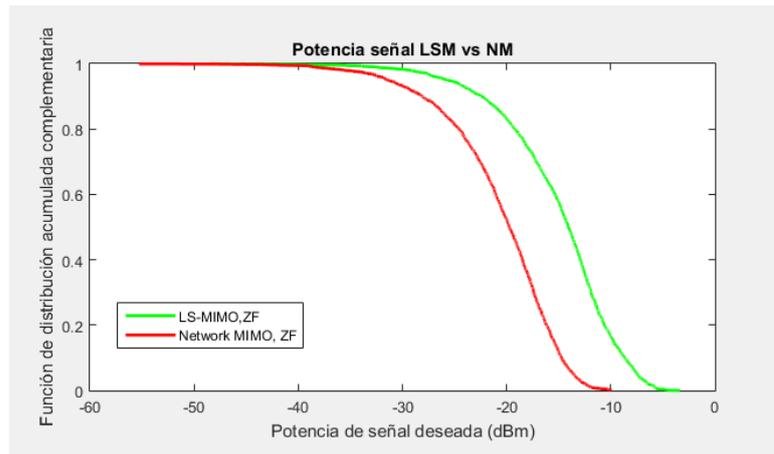


Figura 5.3: Potencia de señal deseada del usuario ubicado en (1735m,1735m) los sistemas LS-MIMO y N-MIMO. Teniendo en cuenta que $\zeta = 1$.

5.2.1 Potencia de señal aumentando grados de libertad

Al aumentar el número de grados de libertad (mayor número de antenas en cada BS), se puede notar, en líneas generales, una mejora considerable de ambos sistemas en términos de potencia. Sin embargo, y al igual que sucede en el apartado anterior, LS-MIMO domina nuevamente para diferentes valores de ζ a N-MIMO tal y como se puede apreciar en las figuras 5.4 y 5.5. Al pasar de $\zeta = 1$ a $\zeta = 5$ se puede apreciar como hay una mejora aproximada de 10 dB en los niveles de potencia de señal deseada tanto en N-MIMO como en LS-MIMO. De todas formas, cuando se aumenta a nueve el número de grados de libertad, esta mejora se ve reducida a unos 4dB aproximadamente. Se puede deducir que la mejora derivada del incremento de grados de libertad no aumenta de forma lineal y a medida que se aumenta el número de ζ su impacto en las prestaciones del sistema va disminuyendo. Si bien es cierto que para el usuario central del clúster la diferencia entre ambos sistemas para un mismo valor ζ no varía prácticamente nada; para el usuario centrado en su celda, se nota que la brecha entre ambos sistemas se ha ampliado notablemente llegando a una diferencia aproximada de 5dB. Como curiosidad, destacar que un sistema LS-MIMO con $\zeta = 5$ ofrece mejores prestaciones que un sistema N-MIMO con $\zeta = 9$. Se puede deducir que un sistema LS-MIMO explota de una forma más eficiente el exceso de grados de libertad disponibles en comparación a la arquitectura N-MIMO. Tal y como expone [6], la potencia interferente es similar tanto en N-MIMO como en LS-MIMO, pero la potencia de señal deseada es más alta en el caso de LS-MIMO.

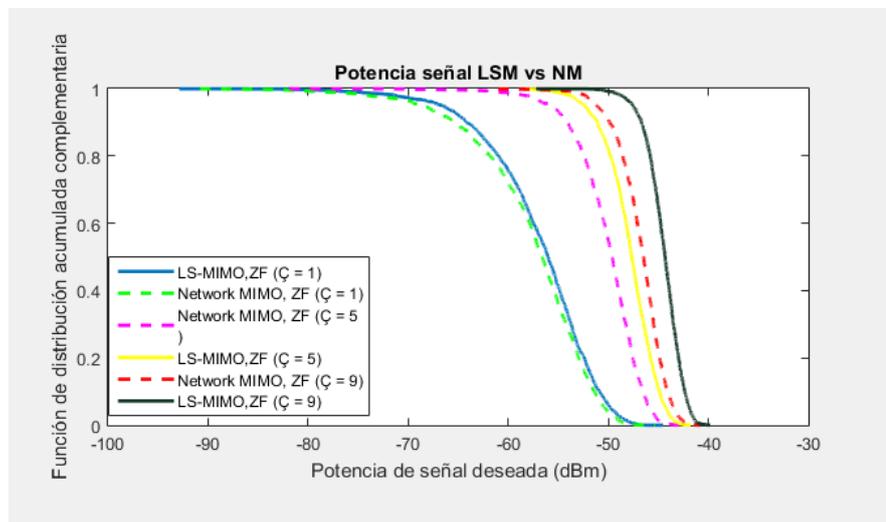


Figura 5.4: CCDF de la potencia de señal deseada para el usuario ubicado en (1515m,1515m) en los sistemas LS-MIMO y N-MIMO al aumentar los grados de libertad.

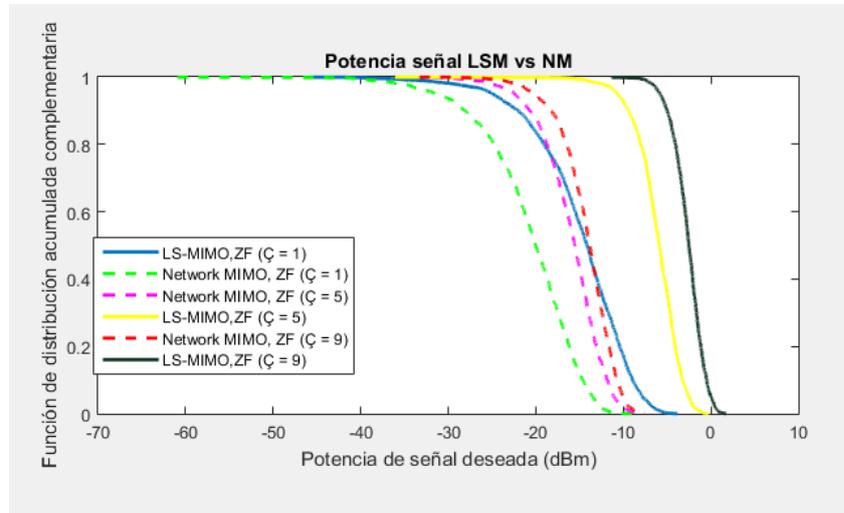


Figura 5.5: CCDF de la potencia de señal deseada para el usuario ubicado en (1735m,1735m) en los sistemas LS-MIMO y N-MIMO al aumentar los grados de libertad.

5.3 Potencia de la interferencia

En esta sección se observa la CDF (Cumulative Distribution Function) de la potencia de la interferencia agregada de los dos usuarios emplazados en ubicaciones fijas. La CDF de una variable aleatoria real (potencia de interferencia) es la probabilidad de que esta variable tome valores menores o iguales que un cierto valor x . En primer lugar, llama la atención la gran similitud que presentan ambas gráficas; es cierto que el usuario central a nivel de interferencia experimenta prácticamente los mismos valores de potencia interferente mientras que el usuario localizado cerca de la BS sufre ligeras alteraciones apreciables en las Figuras 5.6 y 5.7, en cualquier caso nada demasiado notorio.

Al plantear diferentes técnicas de mitigación de interferencia, es posible pensar que ambos esquemas van a generar resultados dispares en cuanto a su rendimiento en este aspecto (generan su matriz de *beamforming* a partir de matrices de canales diferentes). Sin embargo, desde el punto de vista del usuario, se tiene el mismo número de rayos interferentes provenientes del mismo conjunto de ubicaciones de las BSs en ambos sistemas. Además, en LS-MIMO tanto los vectores de canal como los rayos son isotrópicos al igual que en Network MIMO. Esto junto a la segunda suposición del sistema donde se expresa que los filtros ZF usados por cada BS interferente en LS-MIMO y los filtros ZF diseñados en cada clúster interferente de N-MIMO son tratados como vectores ortogonales (produciendo K señales interferentes independientes por cada BS en LS-MIMO y K_c señales interferentes independientes en cada clúster) conlleva a tener una distribución similar de la potencia de interferencia agregada en ambos sistemas.

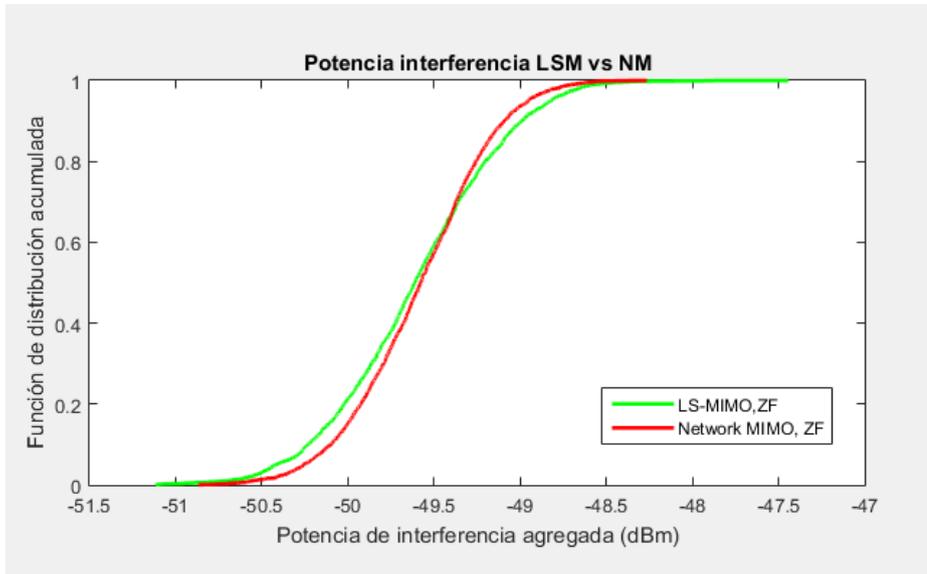


Figura 5.6: CDF de la potencia de interferencia agregada para el usuario ubicado en (1515m,1515m) en los sistemas LS-MIMO y N-MIMO.

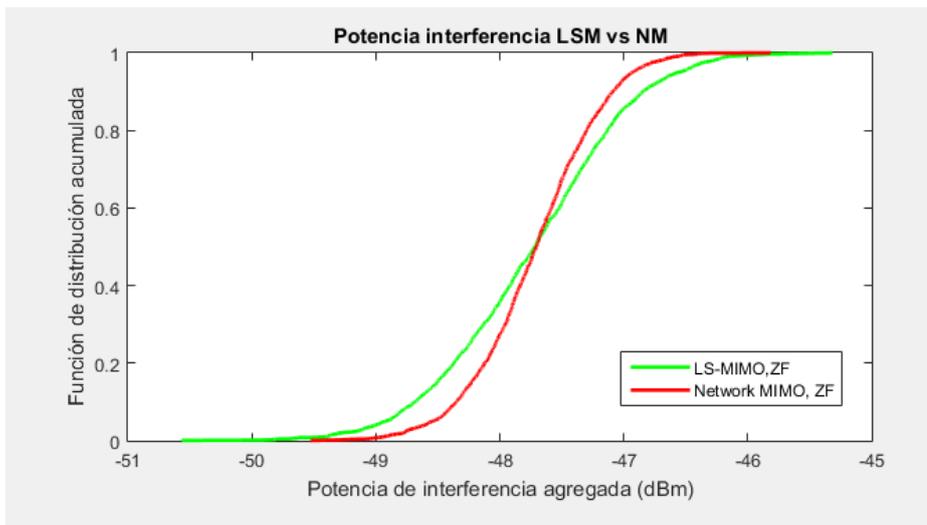


Figura 5.7: CDF de la potencia de interferencia agregada para el usuario ubicado en (1735m,1735m) en los sistemas LS-MIMO y N-MIMO.

5.3.1 Potencia de interferencia aumentando grados de libertad

Para proseguir con el estudio de ambas técnicas, se han introducido mayor número de grados de libertad para analizar el impacto que este parámetro causa sobre los sistemas. A diferencia del punto anterior, en este caso el aumento de ζ no implica un aumento considerable del rendimiento, la potencia interferente disminuye algún dBm pero el beneficio obtenido no compensa el coste del despliegue que habría que realizar. Al igual que sucede con $\zeta = 1$ ambos sistemas presentan gráficas prácticamente idénticas (figuras 5.8 y 5.9) para ambos usuarios y, esta vez, la distancia del usuario no juega un

5. RESULTADOS

papel tan crítico al presentar variaciones mínimas entre el usuario central de clúster y el centrado en la BS. Se puede deducir que el exceso de grados de libertad no tiene un impacto directo en ninguno de los dos sistemas para reducir la potencia de interferencia agregada en los terminales móviles.

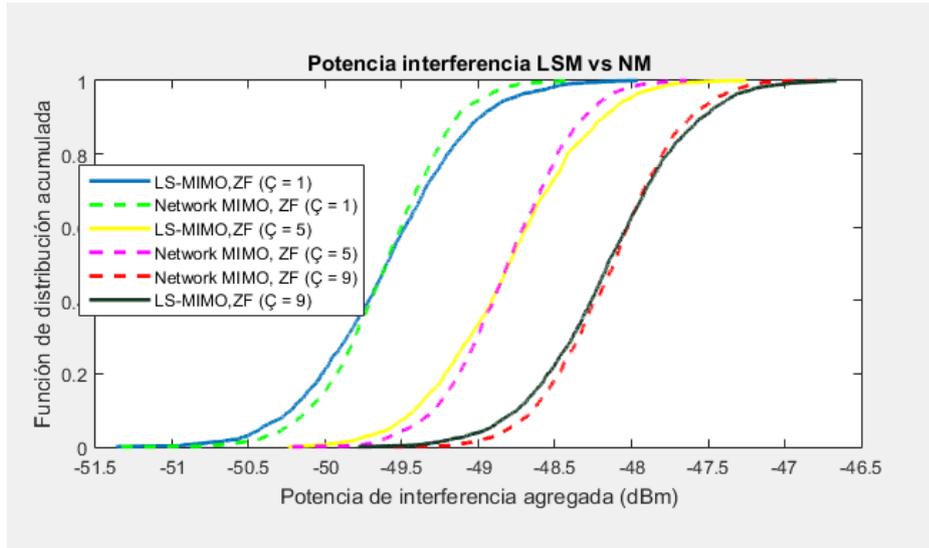


Figura 5.8: CDF de la potencia de interferencia agregada para el usuario ubicado en (1515m,1515m) en los sistemas LS-MIMO y N-MIMO al aumentar los grados de libertad.

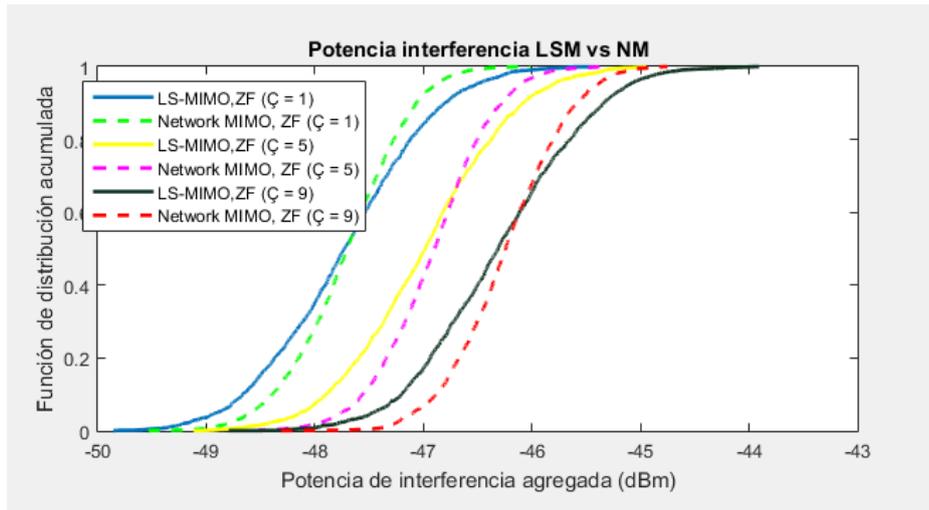


Figura 5.9: CDF de la potencia de interferencia agregada para el usuario ubicado en (1735m,1735m) en los sistemas LS-MIMO y N-MIMO al aumentar los grados de libertad.

5.4 Potencia de señal en una celda

En esta segunda parte del estudio, se estudiará el comportamiento a nivel de celda de los diferentes parámetros vistos anteriormente y se añadirá la SINR media. La celda analizada será la celda superior derecha del clúster central como refleja la Fig. 5.10, este hecho es relevante de cara a la interpretación de las diferentes gráficas que se expondrán a continuación.

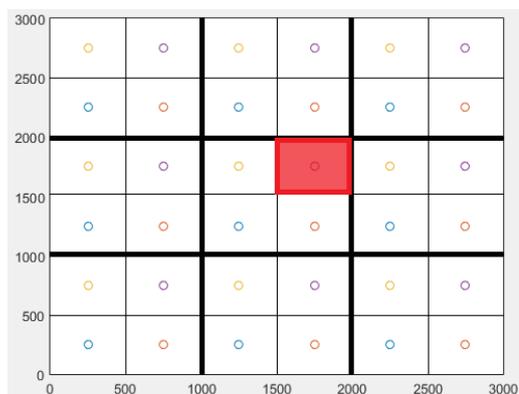


Figura 5.10: Celda del clúster central sobre la que se realiza el estudio

Para llevar a cabo esta investigación se divide toda la celda en forma de rejilla cuadrada en regiones de 10×10 m. con un usuario ubicado en el centro. Dicho de otra manera, se coloca un usuario cada $100m^2$, teniendo en cuenta que la dimensión de la celda es de 500×500 m. (un total de $250.000m^2$), habrá un total de 2500 usuarios virtuales desplegados en la celda, sobre los cuáles se realizarán los cálculos de los diferentes parámetros.

En primer lugar se hará hincapié en cómo se distribuye la potencia de la señal a lo largo de todo el sistema. Como se puede observar, en la forma de la gráfica no se aprecia ninguna diferencia significativa entre la Fig. 5.11, donde se encuentra la distribución de la intensidad de potencia a lo largo de toda la superficie en LS-MIMO, y la Fig. 5.12 que representa la misma característica para N-MIMO. Sin embargo, los valores que se encuentran en las gráficas, especialmente en las zonas más externas de la celda, sí que presentan cierta variación, ya que LS-MIMO parece ofrecer una potencia de señal deseada entre 5 y 10 dBm superior respecto a N-MIMO. En la zona central de la celda, lógicamente, se aprecia un incremento progresivo en los niveles de potencia de señal recibida por el usuario a medida que se aproxima a la BS; los máximos valores se alcanzan en el emplazamiento de la BS y en ambas topologías están alrededor de los 0 dBm.

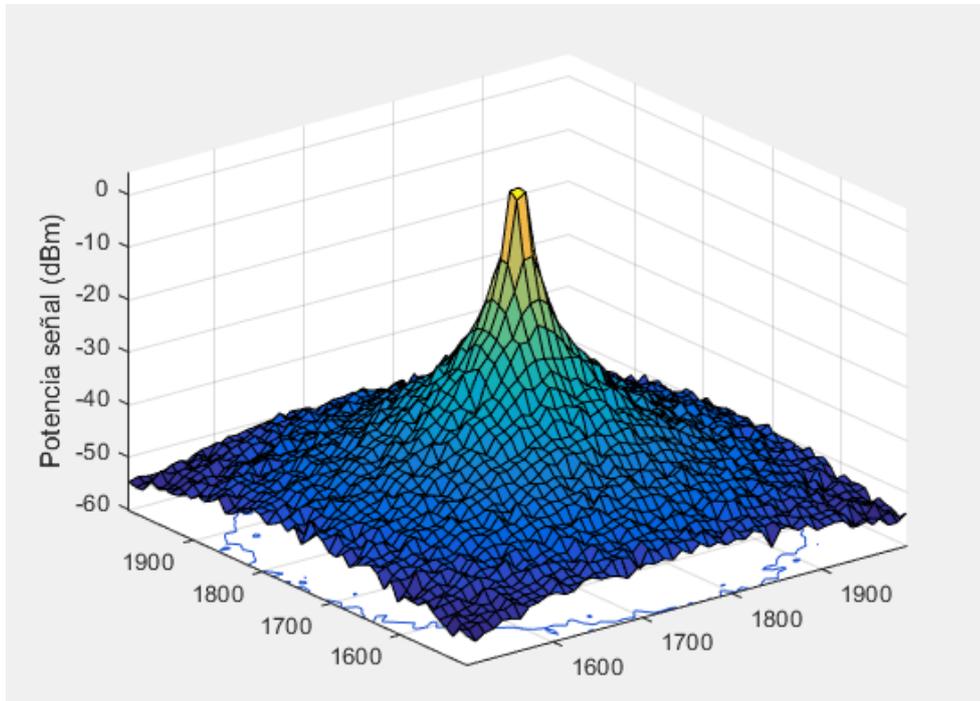


Figura 5.11: Distribución de la potencia de señal recibida en una celda LS-MIMO

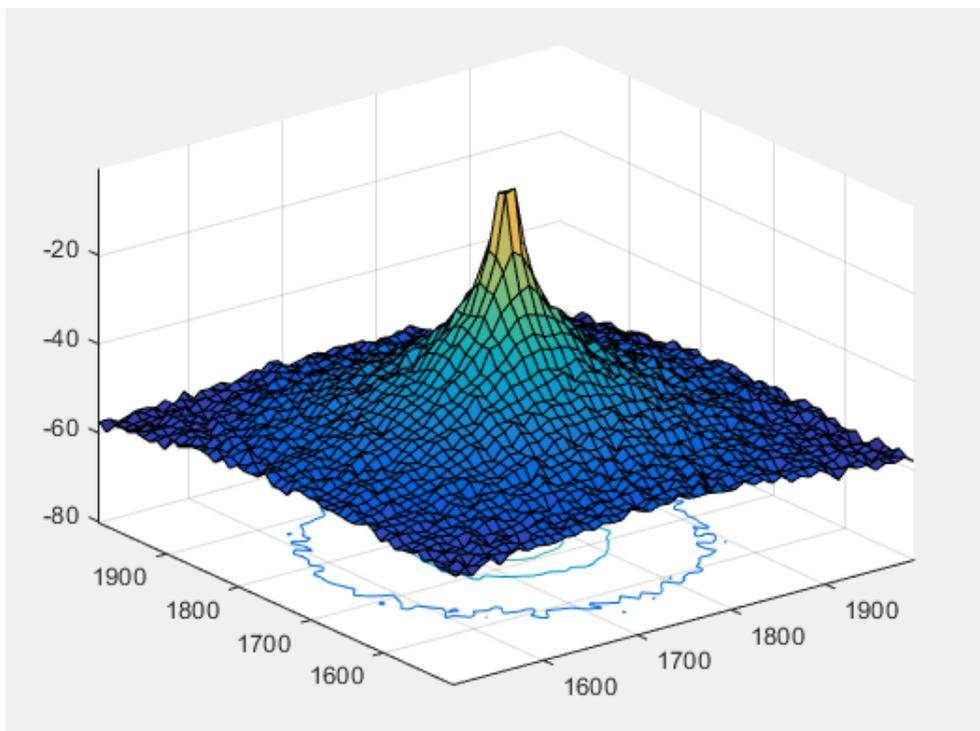


Figura 5.12: Distribución de la potencia de señal recibida en una celda N-MIMO

Se puede observar la celda a nivel 2D, tal y como reflejan la Fig. 5.13 y la Fig. 5.14 para LS-MIMO y N-MIMO respectivamente. Se puede apreciar como se generan una serie de círculos concéntricos donde cada uno de ellos engloba unos niveles de potencia similares. La parte central se caracteriza por tonalidades amarillas y verdes denotando buena señal, mientras que toda la zona envolvente presenta una tonalidad más azulada, es decir, peor calidad de señal como consecuencia de una mayor distancia respecto a la BS y un mayor nivel de interferencia. Si se presta atención, se puede observar como en las esquinas de la Fig. 5.14 se encuentra un color azul oscuro mucho más pronunciado que en la Fig. 5.21 reflejando la diferencia de 5 a 10 dBm comentada previamente, así pues, queda demostrado que en las zonas limítrofes de la celda, LS-MIMO ofrece mejores niveles de potencia deseada que N-MIMO.

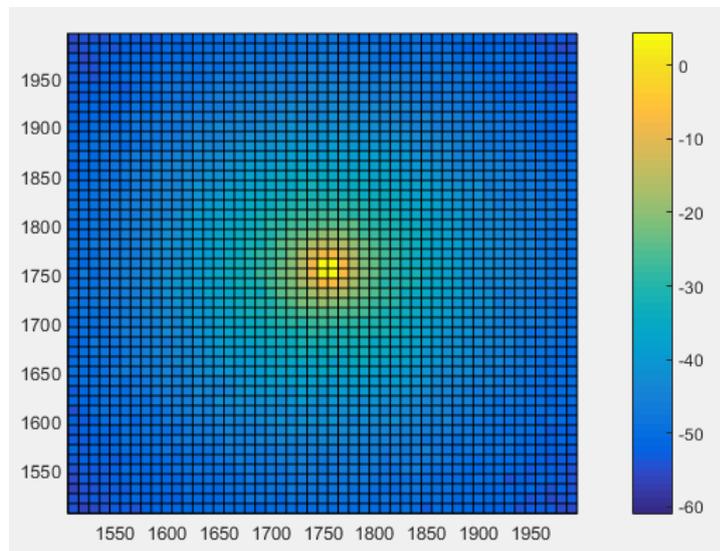


Figura 5.13: Vista de planta de la distribución de la potencia en una celda LS-MIMO

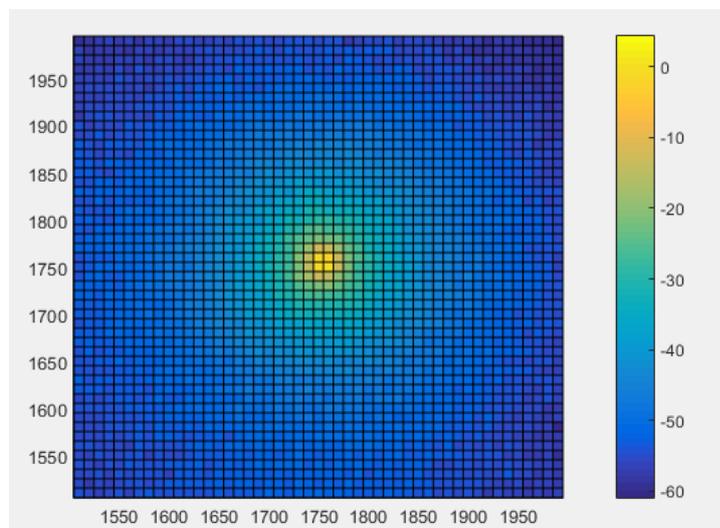


Figura 5.14: Vista de planta de la distribución de la potencia en una celda N-MIMO

5.5 Potencia de interferencia en una celda

A continuación, se analizará la característica clave de este proyecto, como es la interferencia, y cuál es su comportamiento a lo largo de esta región celular. Inicialmente, las Figuras 5.15 y 5.16 son unas gráficas que debido a su forma pueden resultar chocantes, pero se debe recordar que se hace alusión simplemente a la celda superior derecha del clúster. Si se representara todo el clúster, quedaría un volumen cóncavo centrado en el punto medio del clúster y que se va expandiendo hacia los extremos del mismo. Aquí se analiza una sección de ese volumen y se observan datos muy interesantes, como la simetría que presenta la interferencia respecto de la diagonal que conforman el centro del clúster(1500m,1500m) y la esquina superior derecha de la celda(2000m,2000m). Esto sucede como consecuencia de la topología de red escogida (Fig. 5.1) y su forma cuadrangular. Así pues, en el centro del clúster se observan los mayores niveles de intensidad en cuanto a potencia de interferencia al ser la zona límite de las cuatro BSs y donde entran en contacto las diferentes señales emitidas por todas éstas. A medida que el usuario se aleja, tanto hacia el norte como hacia el este, estos niveles van decayendo de forma idéntica, pues el usuario se aleja de la zona de concurrencia de todas las señales de las diferentes BSs.

Tal y como se ha valorado, para los dos usuarios ubicados en posiciones fijas, la potencia de interferencia presenta un comportamiento mucho más homogéneo en ambas tecnologías tal y como pronosticaba [6]. No se puede decir que ninguna presente una ventaja destacada respecto de la otra al presentar valores prácticamente idénticos a lo largo de toda la celda y variar de forma uniforme a medida que aumenta la distancia respecto del centro del clúster.

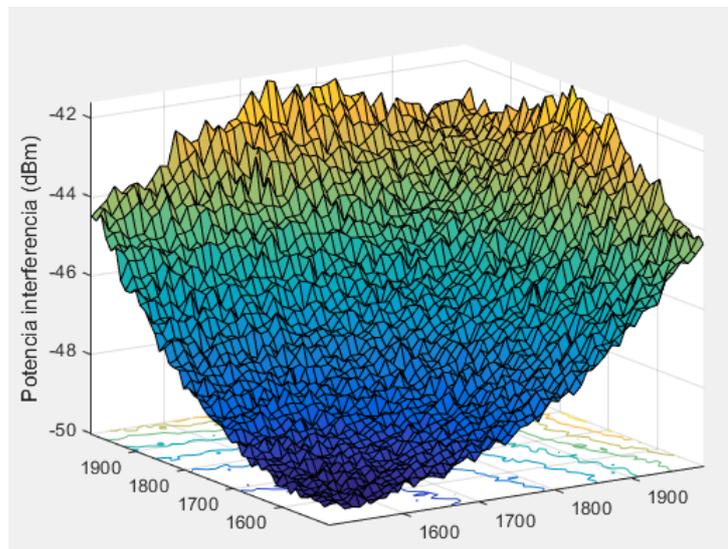


Figura 5.15: Distribución de la potencia de interferencia recibida en una celda LS-MIMO

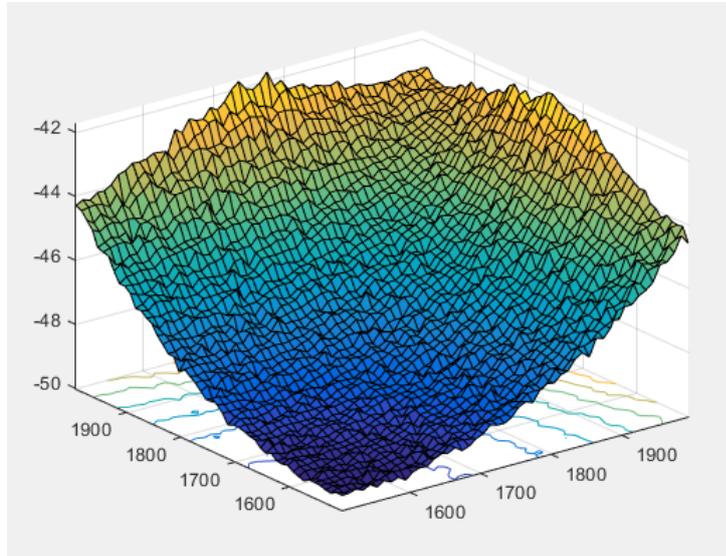


Figura 5.16: Distribución de la potencia de interferencia recibida en una celda N-MIMO

Nuevamente, se observarán en 2D los niveles de interferencia (Figuras 5.17 y 5.18), que aportan una visión distinta sobre los resultados obtenidos. Se encuentran los sectores circulares correspondientes a esta celda donde cada uno simboliza una potencia bastante definida. Lógicamente, a medida que el usuario se aleja del centro del clúster, todas las señales emitidas por las diferentes BSs hacia los usuarios ubicados en esa región del espacio van perdiendo potencia como consecuencia del incremento de la distancia y la interferencia dañina que éstas pudieran ocasionar se va mitigando a medida que el usuario se desplaza a zonas más externas de la celda.

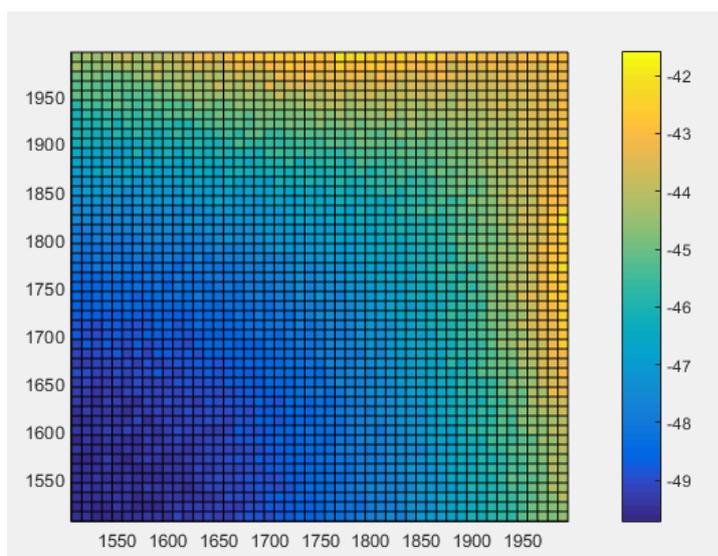


Figura 5.17: Vista de planta de la distribución de la interferencia en una celda LS-MIMO

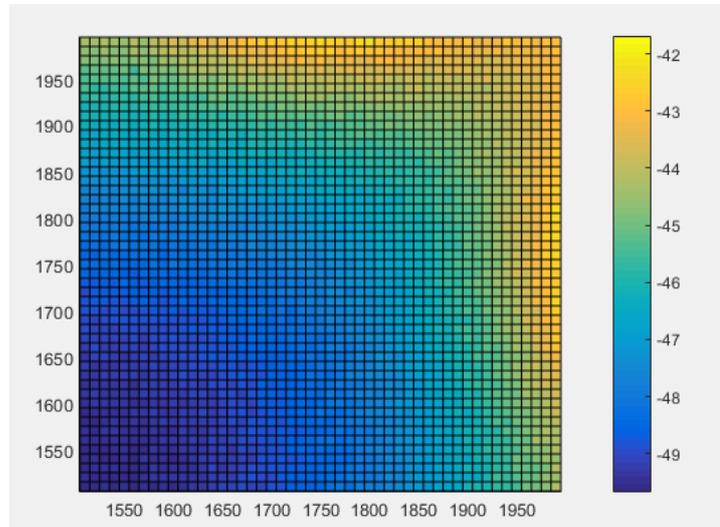


Figura 5.18: Vista de planta de la distribución de la interferencia en una celda N-MIMO

5.6 SINR en una celda

Finalmente, se encuentran las gráficas referentes a la distribución de la SINR media para los diferentes usuarios desplegados en la celda (Figuras 5.19 y 5.20). Al igual que sucede en los anteriores apartados, tanto LS-MIMO como N-MIMO presentan un comportamiento parejo, incrementando su nivel de SINR a medida que el usuario se acerca a la ubicación de la BS y un comportamiento bastante plano sin grandes variaciones en la zona que envuelve el centro de la celda. Como consecuencia directa de los dos análisis anteriores, se conoce que los valores de SINR van a ser dispares en ambos sistemas. Mientras que los valores de interferencia se presentan bastante parejos, los valores relativos a la potencia de señal deseada si que presentan ciertas variaciones considerables, especialmente, en los límites de la celda. Así pues en la zona más externa de la celda, la diferencia de SINR en ambos sistemas si que resulta significativa.

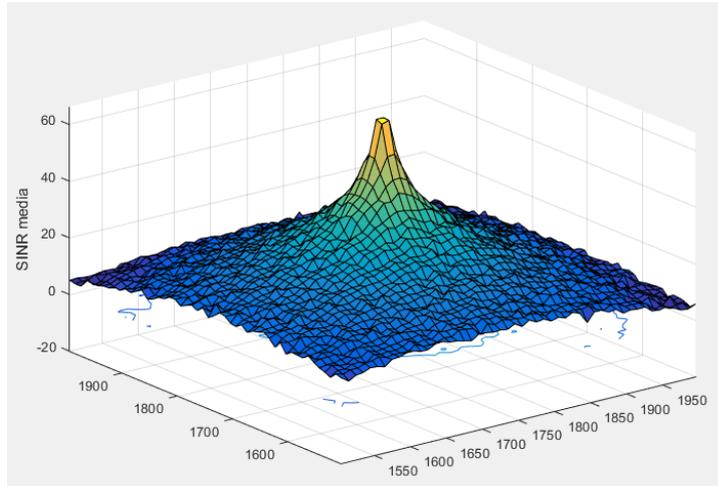


Figura 5.19: Distribución de la SINR en una celda LS-MIMO.

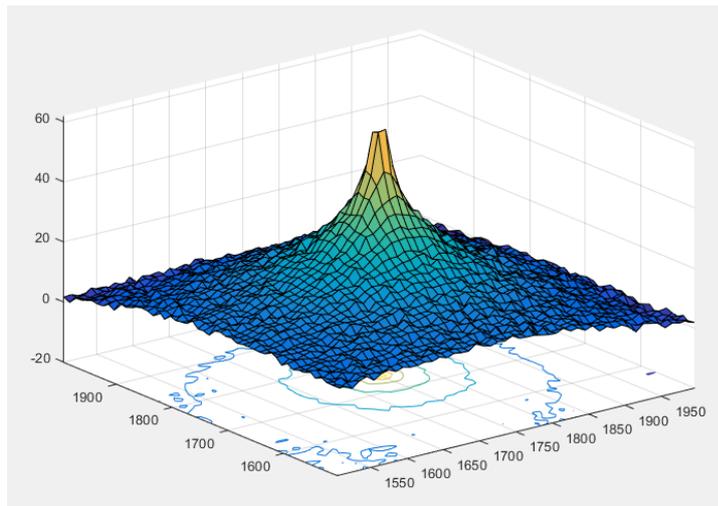


Figura 5.20: Distribución de la SINR en una celda N-MIMO.

Para concluir, manteniendo la línea de los puntos anteriores, la vista de planta de la SINR es visualizada en las figuras 5.21 y 5.22 donde vuelven a aparecer los círculos concéntricos centrado en la posición de la BS (1750m,1750m). Debido a la suposición número 4 enunciada previamente, al tener una repartición equitativa de potencia para todas las señales, obviamente se obtiene un comportamiento semejante para usuarios ubicados a distancias equitativas respecto la BS, si se realizarán asignaciones de potencia óptimas para cada usuario en función de las condiciones del canal, seguramente se apreciarían resultados un tanto diferentes a los expuestos y una mejora global del sistema, pero debido al gran aumento en la complejidad que implicaría esta opción, se opta por un modelo más simplificado y se deja esta posibilidad para futuras líneas de investigación.

5. RESULTADOS

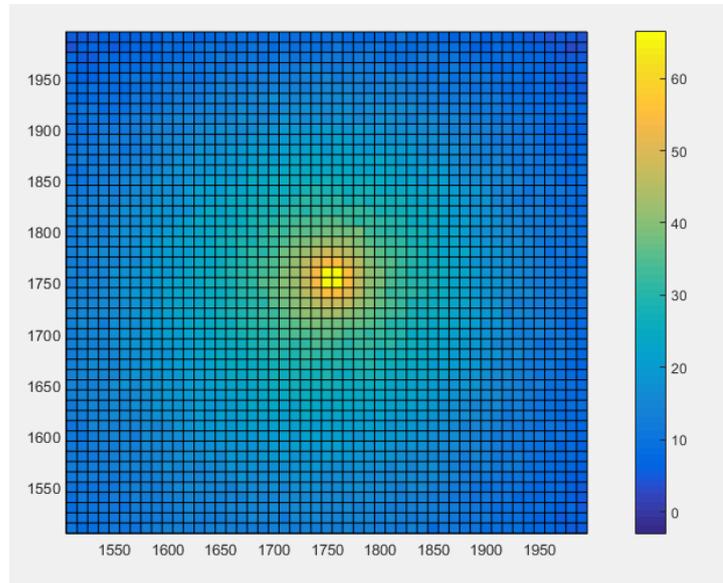


Figura 5.21: Vista de planta de la distribución de la SINR en una celda LS-MIMO.

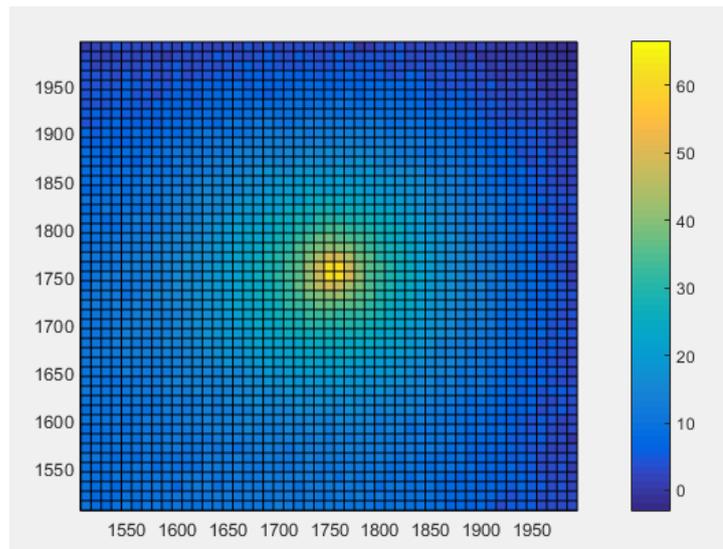


Figura 5.22: Vista de planta de la distribución de la SINR en una celda N-MIMO.

CONCLUSIONES

En este proyecto se han comparado dos de las técnicas más destacadas de mitigación de interferencia multicelular en el canal de bajada que se plantean para las futuras redes de telecomunicaciones 4G/5G como son Large Scale MIMO y Network MIMO [6].

Como se ha podido comprobar, ambos sistemas son capaces de anular la interferencia intraclúster a través de la matriz de *beamforming* ZF. Teniendo en cuenta que para ambos modelos se han asignado los mismos niveles de potencia a las BSs, se ha otorgado el mismo número de grados de libertad y se ha supuesto el mismo conocimiento sobre el estado del canal, parece que hay una técnica ganadora, *Large Scale* MIMO. Sin embargo, las características inherentes a la transmisión cooperativa de *Network* MIMO, donde la señal recibida por el usuario proviene de un conjunto de BSs dispersas, ocasionan una disminución en los niveles de potencia en el terminal móvil como consecuencia de la mayor distancia que han tenido que recorrer hasta llegar a su destino. Este fenómeno se ha podido observar cuando se comparan ambos sistemas para los usuarios ubicados en posiciones fijas donde LS-MIMO siempre presenta valores superiores respecto a N-MIMO y cuya diferencia se hace más evidente a medida que aumentan los grados de libertad. Este hecho, es el factor clave que ha inclinado la balanza en favor de una tecnología u otra.

En este proyecto, también se han estudiado los niveles de interferencia que recibían los usuarios al aplicar ambas técnicas. Ambos sistemas tienen su propia manera de calcular los coeficientes de los filtros ZF al calcular la matriz de *beamforming* de forma independiente un sistema respecto del otro; de todas maneras, aunque pudiera parecer que diferentes implementaciones aportarían resultados dispares, se han observado cómo la interferencia sigue una distribución prácticamente idéntica en ambos casos sin llegar a mostrar superioridad de rendimiento en ninguno de los dos sistemas, ni siquiera al aumentar los grados de libertad disponibles.

6. CONCLUSIONES

En la segunda parte de la experimentación se ha abordado el análisis de ambas técnicas a nivel de celda, valorando el comportamiento de los anteriores parámetros a lo largo de todo el área celular. Mientras que los niveles de interferencia presentan valores similares en ambos sistemas, los niveles de potencia y SINR sí que exhiben una diferencia más significativa al encontrar variaciones alrededor de 5 y 10 dBm en las zonas limítrofes de la celda en términos de potencia de señal deseada que finalmente derivarán en una mayor SINR en las arquitecturas LSM. De todas formas, como se ha podido observar en las diferentes gráficas tridimensionales, tanto LS-MIMO como N-MIMO exhiben un comportamiento similar a lo largo de toda la región celular, incrementando su rendimiento en zonas próximas a la BS y empeorando sus prestaciones a medida que el usuario se aleja de ésta. Sin embargo, debido a la ventaja que presenta en términos de potencia de señal (ventaja que se incrementa notoriamente al incrementar los grados de libertad) y SINR (a pesar de tener valores semejantes de interferencia, la diferencia en la potencia de señal deseada conlleva que LSM también presente valores de SINR superiores respecto a NM) se deduce que LS-MIMO sigue postulándose como el mejor sistema para la mitigación de la interferencia intercelular.

Finalmente, a pesar de que ambos sistemas son capaces de cumplir con su objetivo de mitigación de interferencia intercelular, es cierto que se observan comportamientos más favorables para LS-MIMO en comparación a Network MIMO. Además, cabe destacar que el coste de implementación de un sistema LS-MIMO, donde básicamente solo se deberían incrementar el número de antenas en cada BS, respecto al coste que implicaría el procesado de datos de forma conjunta y los diferentes enlaces de *backhaul* entre BSs en un sistema *Network MIMO*, es bastante inferior para la primera topología. Se concluye entonces la realización de este TFG considerando la técnica de mitigación de interferencia intercelular *Large-Scale MIMO* como la más apropiada y que mejor se adapta a todos los retos que presentan las futuras generaciones de redes de comunicaciones móviles.

A pesar de los grandes beneficios que son ofrecidos por LSM, existen varios retos que se deben solucionar para poder conseguir implementaciones de esta arquitectura en un entorno real. Se deja para líneas de investigación futuras la solución para diferentes problemas que plantea LSM tales como: determinar cuál es la política de planificación de usuarios (*scheduling*) más eficiente, describir el funcionamiento de sistemas cooperativos en ausencia de una CSI precisa y como afecta al rendimiento del mismo, y analizar el impacto que supone establecer las limitaciones de potencia a nivel de BS.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] E. G. Larsson, O. Edfors, F. Tufvesson, and T. L. Marzetta, “Massive MIMO for next generation wireless systems,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 2, pp. 186–195, 2014. (document), 4
- [2] V. Jungnickel, K. Manolakis, W. Zirwas, B. Panzner, V. Braun, M. Lossow, M. Sternad, R. Apelfröjd, and T. Svensson, “The role of small cells, coordinated multipoint, and massive MIMO in 5G,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 49, no. 2, pp. 102–111, Feb 2011. (document), 4
- [3] A. Nosratinia, T. E. Hunter, and A. Hedayat, “Cooperative communication in wireless networks,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 42, no. 10, pp. 74–80, 2004. (document), 3.1
- [4] C. Wang, X. Hong, X. Ge, X. Cheng, G. Zhang, and J. Thompson, “Cooperative MIMO channel models: A survey,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 48, no. 2, pp. 80–87, Jan 2010. (document), 3.1, 3.3
- [5] R. Irmer, H. Droste, P. Marsch, M. Grieger, G. Fettweis, S. Brueck, H. Mayer, L. Thiele, and V. Jungnickel, “Coordinated multipoint: Concepts, performance, and field trial results,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 49, no. 2, pp. 102–111, Feb 2011. (document), 3.1, 3.3.3, 3.3.3
- [6] K. Hosseini, W. Yu, and R. Adve, “Large-scale MIMO versus network MIMO for multicell interference mitigation,” *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 8, no. 5, pp. 930–941, Oct 2014. (document), 1, 1, 4, 5.2.1, 5.5, 6
- [7] Cisco. Cisco visual networking index: Global mobile data traffic forecast update, 2016-2021. [Online]. Available: <http://globalnewsroom.cisco.com/es/la/press-releases/decimo-cisco-visual-networking-index-vni-mobile--1242483> 1
- [8] R. Bown. Time division multiplex system for signals of different bandwidth. [Online]. Available: <https://www.google.com/patents/US2564419> 2.2
- [9] M.-H. Golbon-Haghighi. Beamforming in wireless networks. [Online]. Available: <http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/53332.pdf> 2.5
- [10] Z. C. Phyo and A. Taparugssanagorn, “Hybrid analog-digital downlink beamforming for massive MIMO system with uniform and non-uniform linear arrays,” *Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, June 2016. 2.5

BIBLIOGRAFÍA

- [11] N. Jindal, "MIMO broadcast channels with finite-rate feedback," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 52, no. 11, pp. 5045–5060, October 2006. 2.6
- [12] D. Gesbert, S. Hanly, H. Huang, S. S. Sitz, O. Simeone, and W. Yu, "Multicell MIMO cooperative networks: A new look at interference," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 28, no. 9, pp. 1380–1408, 2008. 3.1