



ESCUELA DE INGENIERÍA DE FUENLABRADA

Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Trabajo Fin de Grado

**TRANSMISIONES MULTICAST EN
ENTORNOS *CELL-FREE MASSIVE*
MIMO: ANÁLISIS DE
PRESTACIONES DE DIFERENTES
PRECODIFICADORES**

Autor : Adrián Espinosa Robles

Tutor : Alejandro de la Fuente Iglesias

Curso Académico 2024/2025

Resumen

A medida que avanza el mundo digital actual, se vuelve más notable el gran impacto que los sistemas de telecomunicaciones, en concreto las redes inalámbricas, van a suponer para el desarrollo y progreso de la sociedad. Dentro de estas redes, surgen en ocasiones tecnologías novedosas que permiten el establecimiento de nuevas generaciones, o mejoras de las generaciones existentes de tecnología móvil, entre ellas las redes *cell-free massive MIMO* (CF-mMIMO), que se presentan como una tecnología más allá de la quinta generación de redes móviles (*beyond 5G*), obteniendo notables resultados a lo largo de la literatura de estudio.

Para comprender de manera certera cuál es el impacto de esta tecnología, se han realizado diversos análisis e investigaciones, entre los que se incluye el presente trabajo. Este TFG presenta una serie de resultados basados en simulaciones para estudiar el comportamiento y prestaciones de distintos precodificadores distribuidos para las redes CF-mMIMO en escenarios con usuarios uniformemente distribuidos o clusterizados en el entorno, centrándose en la transmisión *multicast* agrupando en subgrupos.

A partir del estudio del estado del arte sobre CF-mMIMO y las transmisiones *multicast*, se establece la base sobre la que presentar el modelo matemático y los parámetros de las simulaciones que se han llevado a cabo; realizando un análisis profundo de los resultados sobre la eficiencia espectral obtenida con los precodificadores *conjugate beamforming* (CB) y sus variantes, finalizando con unas conclusiones sobre las que se destaca el alto rendimiento de una de las soluciones más simples, y líneas futuras de investigación sobre este relevante campo de estudio.

Palabras Clave

Beyond 5G, *cell-free massive MIMO*, *multicast*, *unicast*, precodificadores distribuidos, *conjugate beamforming* (CB), *normalized conjugate beamforming* (NCB), *enchanced conjugate beamforming* (ECB), agrupación de usuarios, subgrupos, eficiencia espectral.

Abstract

As the contemporary digital world advances, it becomes more noticeable the significant impact that telecommunication systems, especially wireless networks, will have on society's development and progress. Innovative technologies often arise within these networks, helping to create new generations of mobile networks or improve existing ones. The technology of CF-mMIMO is presented as one of these technologies beyond the fifth generation of mobile networks (beyond 5G), achieving notable results throughout the studied literature.

In order to fully understand the impact of this technology, numerous studies and investigations have been conducted, including the present work. This TFG presents a series of results based on simulations to study the behaviour and performance of various distributed precoders for CF-mMIMO networks, considering scenarios with users uniformly distributed or clustered in the case of study, focusing on subgroup-based multicast transmission.

Based on the study and comprehensive review of the state of the art on CF-mMIMO and multicast transmissions, a foundation is established to present a mathematical model and simulation framework. The study conducts a detailed analysis of spectral efficiency results using conjugate beamforming precoders and their variations. It concludes with some key points, emphasizing the high performance of one of the simplest precoders and future research directions in this relevant field.

Key words

Beyond 5G, cell-free massive MIMO, multicast, unicast, distributed precoders, conjugate beamforming (CB), normalized conjugate beamforming (NCB), enhanced conjugate beamforming (ECB), subgrouping, subgroup, spectral efficiency (SE)

Agradecimientos

Este trabajo ha supuesto el cierre de mi etapa universitaria, y la verdad es que me gustaría agradecer a todas las personas y experiencias que he vivido, y que me han hecho convertirme en la persona que soy en la actualidad.

A mis padres, Joaquín y Almudena, por haberme dado (y seguir haciéndolo) todo el cariño y las "herramientas" necesarias para poder ser una persona inteligente, crítica y, sobre todo, buena con el resto de la gente, intentando poner mi granito de arena y dejar mi huella en el mundo de la mejor manera posible.

A mi hermano Sergio, por su apoyo en todos los altos y bajos de mi trayecto, y todas esas noches interminables en las que filosofábamos sobre temas interesantes, o que nosotros hacíamos interesantes. Sé que llegarás lejos tanto en lo personal como en todo lo que te propongas.

A mi familia, porque sé que en todos ellos tengo un pilar sobre el que apoyarme por cualquier motivo, y cuyo cariño sentiré siempre.

A mi "monito", porque aunque es la persona que menos tiempo me ha acompañado durante mi vida, me ha apoyado en todas mis decisiones y dado ánimos para sobrellevar todos los baches que he ido teniendo, y sé que formará parte del resto de mi vida.

A mis amigos de la universidad, mi "valor absoluto", por acompañarme en este camino tanto en los buenos momentos después de exámenes, dentro y fuera de clase, como en las duras etapas de estudio previas, en las que a veces nos llevábamos las manos a la cabeza.

A mis amigos de toda la vida, *Papillots* siempre será un grupo muy heterogéneo donde prevalece echarse cosas en cara, enfadarse, pero, por encima de todo, nuestra amistad.

A mi tutor Alejandro, porque sin él no habría tenido la mitad del interés que tengo actualmente por las redes de telecomunicación y por ser un gran profesor, tutor y persona, que me ha ayudado y apoyado en todo momento.

Por último, quiero agradecer a todas las personas que en algún momento han pasado por mi vida, ya que sin todos esos encuentros y experiencias, no sería la misma persona que soy hoy.

Gracias, de corazón.

Índice general

Resumen	I
Abstract	II
Agradecimientos	III
Índice general	VI
Lista de figuras	VIII
Lista de tablas	X
Acrónimos	XI
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Motivación	2
1.2 Objetivos del proyecto	3
1.2.1 Objetivo general	3
1.2.2 Objetivos específicos	3
1.3 Metodología de trabajo y planificación temporal	4
1.4 Estructura de la memoria	5
2 ESTADO DEL ARTE	6
2.1 Fundamentos y evolución de las redes móviles	7
2.2 Fundamentos de las redes 5G	7
2.2.1 Principales aplicaciones de la tecnología 5G	7
2.2.2 <i>Massive MIMO</i>	9
2.3 <i>Cell-free massive MIMO</i>	12
2.3.1 Fundamentos y características de las redes <i>cell-free</i>	12
2.3.2 Capacidad de canal y eficiencia espectral	14
2.3.3 Escalabilidad y modelado	16
2.4 <i>Multicast</i> en <i>Cell-free massive MIMO</i>	18
2.4.1 Introducción a las transmisiones <i>multicast</i> en comunicaciones móviles	18
2.4.2 Multicast en MIMO masivo y CF-mMIMO	19

3	MODELADO Y ANÁLISIS: PRECODIFICACIÓN	21
3.1	Modelado analítico y matemático	22
3.1.1	Modelo del sistema y canal	22
3.1.2	Marco de agrupación de usuarios	23
3.2	Precodificadores distribuidos para CF-mMIMO	26
4	SIMULACIÓN Y EVALUACIÓN DE RESULTADOS	30
4.1	Propuesta de estudio	31
4.2	Discusión y análisis de los resultados	33
4.2.1	Escenario con usuarios uniformemente distribuidos	33
4.2.2	Escenario con usuarios en $C = 10$ clústeres de $K_c = 10$ usuarios por clúster espacial	36
4.2.3	Escenario con usuarios agrupados en un único clúster $C = 1$ de $K_c = 100$ usuarios	40
4.2.4	Otros escenarios relevantes en el estudio	43
5	CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO	46
5.1	Conclusiones	47
5.2	Trabajo futuro	49
	BIBLIOGRAFÍA	50

Lista de figuras

1.1	Diagrama de Gantt del presente TFG con la dedicación total y temporización para los distintos capítulos	4
2.1	Esquemas del UL y DL en un sistema mMIMO	11
2.2	Modelo sencillo de red CF-mMIMO con red de acceso radio centralizada y basada en Cloud Computing	13
2.3	Representación esquemática de los distintos modelos de comunicación para emitir información	18
3.1	Esquema gráfico de una red CF-mMIMO con agrupación de usuarios y cooperación de APs en clúster	23
4.1	CDF de la SE acumulada para $K = 100$ usuarios en escenario uniforme ($K_c = 1$ y $C = 100$) con 8 antenas para CB, NCB y ECB	33
4.2	CDF de la SE individual para $K = 100$ usuarios en escenario uniforme con 8 antenas para ECB	35
4.3	CDF de la ASE <i>unicast</i> para $K = 100$ usuarios en escenario uniforme ($K_c = 1$ y $C = 100$) para distinto número N de antenas en los AP para CB, NCB y ECB	36
4.4	CDF de la ASE con diferentes agrupaciones para $K = 100$ usuarios en escenario uniforme con 8 antenas para CB y ECB	37
4.5	CDF de la SE acumulada para $K = 100$ usuarios en escenario distribuido de en conjuntos de $K = 10$ usuarios con 8 antenas para CB, NCB y ECB	38
4.6	CDF de la SE individual para $K = 100$ usuarios en escenario distribuido de en conjuntos de $K = 10$ usuarios con 8 antenas para CB y NCB	39
4.7	CDF de la SE acumulada para $K = 100$ usuarios en escenario distribuido de en conjuntos de $K = 10$ usuarios para una transmisión <i>multicast</i> $G = 10$ para distinto número N de antenas en los AP	40
4.8	CDF de la SE acumulada para $K = 100$ usuarios en escenario clusterizado en conjuntos de $K = 10$ usuarios para distintas agrupaciones G de transmisión	41
4.9	CDF de la SE acumulada para $K = 100$ usuarios en escenario clusterizado en un único grupo (1x100) con 8 antenas para CB, NCB y ECB	42

4.10	CDF de la SE individual por usuario para $K = 100$ usuarios en escenario clusterizado en un único grupo (1x100) con 8 antenas para CB, NCB y ECB	43
4.11	CDF de la SE acumulada para $K = 100$ usuarios en escenario clusterizado en un único grupo (1x100) para CB, NCB y ECB con diferente número de antenas N	44
4.12	CDF de la SE acumulada para $K = 100$ usuarios en escenario clusterizado en un único grupo (1x100) para CB y NCB con $N=8$ antenas y para todos los casos de transmisión G	45
4.13	CDF de la SE acumulada para $K = 100$ usuarios en distintas distribuciones para CB y NCB con $N=8$ antenas y casos de transmisión <i>multicast</i> con subgrupos ($G=10$) y <i>unicast</i> ($G=100$)	45

Lista de tablas

2.1	Evolución de las principales generaciones de redes móviles	7
2.2	Ejemplos de tecnologías clave en 5G y sus descripciones	9
4.1	Parámetros utilizados en la simulación de los escenarios	32

Acrónimos

3GPP: Third Generation Partnership Project

5G-NR: Fifth Generation New Radio

ASE: Accumulated Spectral Efficiency

AWGN: Additive White Gaussian Noise

BS: Base Station

CB: Conjugate Beamforming

CDF: Cumulative Distribution Function

CF-mMIMO: Cell-free massive MIMO

CPU: Central Processing Unit

CQI: Channel Quality Indicators

CSI: Channel State Information

DCC: Dynamic Cooperation Clustering

DL: Downlink

D-mMIMO: Distributed Massive MIMO

ECB: Enhanced Conjugate Beamforming

EE: Energy Efficiency

eMBB: Enhanced Mobile Broadband

ETSI: European Telecommunications Standards Institute

GPRS: General Packet Radio Service

GSM: Global System for Mobile Communications

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers

IoT: Internet of Things

ITU: International Telecommunication Union

LoS: Line-of-Sight

LTE: Long Term Evolution

MBMS: Multimedia Broadcast and Multicast Service

MBS: Multicast and Broadcast Service

MCS: Modulation and Coding Scheme

MIMO: Multiple Input Multiple Output

ML: Machine Learning

mMIMO: Massive MIMO

mMTCs: Massive Machine Type Communications

NCB: Normalized Conjugate Beamforming

NOMA: Non-Orthogonal Multiple Access

PTM: Point-To-Multipoint

PTP: Point-To-Point

QoS: Quality of Service

RA: Realidad Aumentada

RV: Realidad Virtual

SDMA: Space-Division Multiple Access

SE: Spectral Efficiency

SINR: Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio

SISO: Single Input Single Output

SNR: Signal-to-Noise Ratio

TDD: Time-Division Duplexing

TFG: Trabajo de Fin de Grado

UE: User

UL: Uplink

UMTS: Universal Mobile Telecommunications Systems

URLLCs: Ultra Reliable Low Latency Communications

1

INTRODUCCIÓN

En este primer capítulo se describe la introducción del presente trabajo de fin de grado realizando una visión general sobre la justificación para la realización de este estudio, así como su finalidad y una breve presentación de los capítulos y metodología seguidos. En la sección 1.1, se exponen los eventos, hechos y evidencias que dan sentido a llevar a cabo el análisis. A continuación, en la sección 1.2, se exponen tanto el objetivo general como los objetivos específicos que se pretenden alcanzar en el TFG. La sección 1.3 describe la metodología de trabajo que se ha llevado a cabo, junto con un diagrama de Gantt para explicar la temporización que se ha seguido durante la realización del TFG. Finalmente, en la sección 1.4 se presentan los distintos apartados que incluye la memoria y una breve presentación de cada uno.

1.1. Motivación

En la actualidad, el mundo está cada vez más interconectado gracias a las tecnologías de comunicación inalámbrica de gran alcance, que permiten llevar a cabo la transmisión de grandes y diversas cantidades de información (*i.e.*, datos, voz, etc.) desde cualquier parte del mundo y en cualquier instante de tiempo. Gran parte de esta evolución ha sido gracias a las redes móviles inalámbricas, en particular a los estándares de comunicación desarrollados por el *European Telecommunications Standards Institute* (ETSI), que formalizó el estándar *Global System for Mobile Communications* (GSM) asociado a la segunda generación de redes de radiocomunicación móviles, y posteriormente por el *Third Generation Partnership Project* (3GPP), que desarrolló los estándares *Universal Mobile Telecommunications Systems* (UMTS), *Long Term Evolution* (LTE) y *Fifth Generation New Radio* (5G-NR) asociados a la tercera, cuarta y quinta generación a través de sus *releases*.

Con el avance de las nuevas generaciones móviles y la búsqueda de innovación, se abre un mundo de investigación hacia nuevas tecnologías que aprovechen los recursos disponibles de manera que la experiencia de los usuarios se vea mejorada en su día a día. Un ejemplo de esta búsqueda y desarrollo se da con el 5G, donde ya se están desarrollando múltiples tecnologías que cumplen lo mencionado, como el uso de ondas milimétricas, *massive multiple input multiple output* (mMIMO), *beamforming*, *small cells* y *full dúplex* [1].

A la vista de uno de los últimos informes llevado a cabo por Ericsson, se estima que los suscriptores a la red móvil 5G alcancen los 5,3 mil millones de usuarios, alcanzando un consumo de datos medio de 56 GB al mes por cada smartphone en 2029. Asimismo, se espera que los servicios de “vídeo”, es decir, recursos audiovisuales grabados o en directo con una calidad notable, aumenten exponencialmente en los próximos años, incrementando su porcentaje actual de tráfico en enlace descendente (*downlink*, DL) que oscila entre el 40 % y el 60 % [2].

Estos datos reafirman la gran relevancia de esta búsqueda y la importancia de que se investiguen nuevas técnicas, herramientas y tecnologías que permitan a los usuarios, que crecen rápidamente al igual que los datos que demandan, disfrutar de los servicios de redes móviles de la mejor manera posible. En este contexto, el estudio de la transmisión *multicast* se vuelve más relevante dado el aumento de servicios en los últimos años que requieren de manejo de datos para un número elevado de personas, como transmisiones en vivo y eventos. De la misma forma, las redes *cell-free massive MIMO* (CF-mMIMO) surgen y se están desarrollando como una solución para mejorar y evolucionar hacia un nuevo modelo de pensamiento que ayude a adaptarse a la situación actual, y en especial futura, en el mundo de las telecomunicaciones.

1.2. Objetivos del proyecto

1.2.1. Objetivo general

El objetivo principal de este trabajo de fin de grado (TFG) es observar el comportamiento y resultados del análisis, dentro de una red CF-mMIMO, de las prestaciones de tres tipos de precodificadores distribuidos en el enlace descendente (*downlink*, DL) y su comparativa frente a diversos escenarios *multicast* y *unicast*. Para llevar a cabo este objetivo, se necesita realizar un correcto trabajo de investigación sobre el tema principal CF-mMIMO, así como comprender su evolución desde las primeras redes de telecomunicación hasta la actualidad, pasando por la comprensión de su modelo matemático, los parámetros a tener en cuenta para los precodificadores y realizar las simulaciones necesarias para poder obtener los resultados que permitan extraer conclusiones ventajosas para posibles estudios futuros y el desarrollo de estas tecnologías.

1.2.2. Objetivos específicos

Para lograr la consecución del objetivo general especificado en 1.2.1, se pueden establecer varios objetivos más específicos:

- **OE1:** Estudio de la tecnología base sobre la que se desarrolla “*cell-free Massive MIMO*” y su evolución.
- **OE2:** Análisis y comprensión de los artículos clave en el desarrollo de la tecnología CF-mMIMO, la transmisión DL *multicast* y precodificadores distribuidos en mMIMO.
- **OE3:** Modelado y explicación matemática de los parámetros (*i.e.*, canal, señales, precodificadores etc.) para tener una visión más clara de los pasos a seguir en las simulaciones y la complejidad de cada opción de precodificador.
- **OE4:** Ejecución y análisis de los posibles casos de transmisión *multicast* en CF-mMIMO con distintos parámetros para seleccionar los más relevantes en el estudio.
- **OE5:** Observación y evaluación de los resultados obtenidos, extrapolando conclusiones para los distintos escenarios y comparativas según las métricas de referencia (*i.e.*, la eficiencia espectral [SE, *spectral efficiency*] y la eficiencia espectral acumulada [ASE, *accumulated spectral efficiency*]).

1.3. Metodología de trabajo y planificación temporal

Para llevar a cabo la memoria y simulaciones del TFG, se han llevado a cabo una serie de tareas y consideraciones para poder cumplir con los objetivos anteriormente detallados. En primer lugar, se realizó una investigación profunda sobre el estado del arte de las redes *cell-free massive MIMO*, a través de artículos científicos y libros obtenidos mediante bases de datos disponibles en abierto para la Universidad Rey Juan Carlos (ej.: artículos extraídos de la base de datos IEEE Xplore), así como recursos físicos. Asimismo, se revisaron fuentes bibliográficas sobre la tecnología de transmisión *multicast* y los precodificadores distribuidos incluidos en el presente trabajo.

Posteriormente, se realizaron pruebas y simulaciones en el software Matlab basadas en la teoría y práctica matemática de los casos a simular para extraer las conclusiones, para lo que se modificó parte del código ya proporcionado por otros autores citados y se extrajeron las distintas figuras que modelaban el sistema objeto de estudio de este TFG. Por último, se realizaron las conclusiones del trabajo, a la vista de los resultados obtenidos, y se completó la información de la introducción y los resúmenes.

En la Figura 1.1 se puede observar un diagrama de Gantt que representa de manera gráfica y aproximada la dedicación en horas a cada capítulo del trabajo, así como la temporización de las actividades realizadas, incluyendo sus relaciones y solapamientos. El presente TFG se llevó a cabo desde noviembre de 2023 hasta febrero de 2025, dedicando un mayor esfuerzo en el trabajo el pasado año 2024, en especial los fines de semana debido a incompatibilidades con mi actual puesto de trabajo.

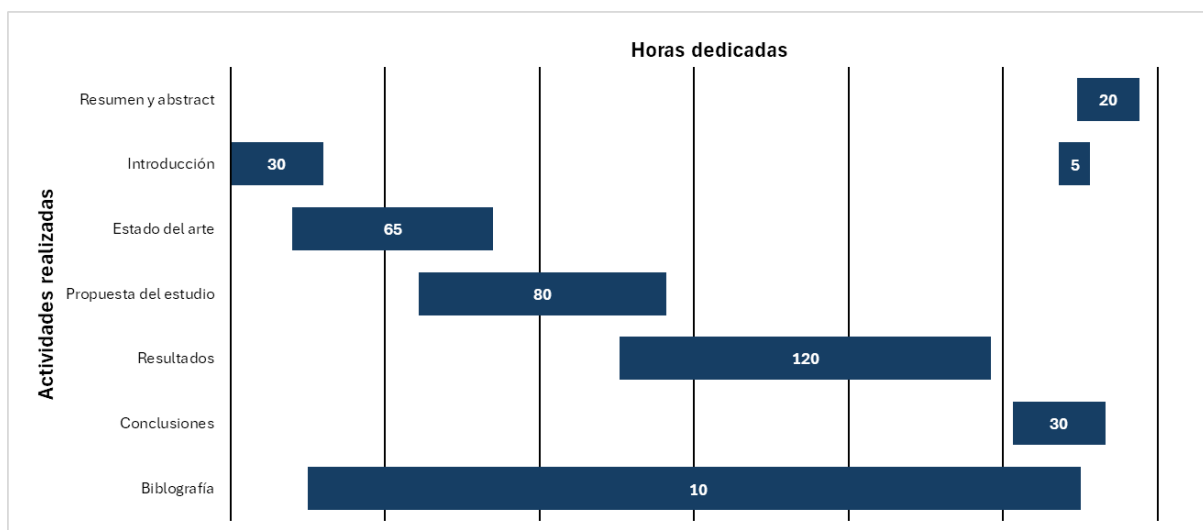


Figura 1.1: Diagrama de Gantt del presente TFG con la dedicación total y temporización para los distintos capítulos

1.4. Estructura de la memoria

Tras exponer el contexto en el que se va a desarrollar este TFG y los objetivos a cumplir, se detallan los contenidos relativos a cada capítulo de la memoria:

- En el *capítulo 1*, se expone una introducción al TFG, manifestando la motivación detrás de la realización del trabajo, presentando los objetivos propuestos, y la estructura y metodología de la memoria.
- En el *capítulo 2*, se realiza una revisión del estado del arte de la tecnología *massive MIMO* y la relación con las redes 5G, su evolución hacia el modelo *cell-free massive MIMO* haciendo hincapié en la modalidad de transmisión *multicast*, objeto principal de este trabajo.
- En el *capítulo 3*, se describe el modelo analítico y matemático de canal en los que se basarán las simulaciones, así como una visión general y analítica de los precodificadores distribuidos en estudio.
- En el *capítulo 4*, se expone con mayor detalle la propuesta de estudio y se analizan y discuten los resultados obtenidos a partir de las simulaciones llevadas a cabo.
- En el *capítulo 5*, se desarrollan las conclusiones sobre los resultados alcanzados y el posterior análisis, así como las futuras líneas de investigación.
- Finalmente, se lista las referencias utilizadas en el desarrollo del trabajo siguiendo el modelo APA.

2

ESTADO DEL ARTE

En este segundo capítulo se presenta el estado del arte sobre los principales conocimientos básicos para comprender el trabajo y las distintas ramas de conocimiento esenciales para su entendimiento. La sección 2.1 presenta una visión actual sobre las redes de telecomunicaciones y su evolución. La sección 2.2 presenta un estudio de la literatura sobre la quinta generación de redes móviles y la tecnología massive MIMO. A continuación, la sección 2.3 expone las características y breve modelado de las redes cell-free massive MIMO. Por último, se muestra en la sección 2.4, un estudio de las redes multicast y su relación para el caso de las redes cell-free massive MIMO.

2.1. Fundamentos y evolución de las redes móviles

Desde la primera revolución industrial, se estableció un notable cambio en la forma que la humanidad tenía para comunicarse. Comenzando por el telégrafo en 1794, se abrieron las puertas del mundo de las telecomunicaciones en el que dos personas podían transmitir un mensaje a distancia sin intermediarios. En los siglos posteriores se fue avanzando en las formas de transmitir la comunicación como con los cables de cobre en 1837, las ondas electromagnéticas en 1896 y la fibra óptica en 1973, pero el paradigma se transformó profundamente con la llegada de las radiocomunicaciones móviles [3].

Las telecomunicaciones, a través de la radiotransmisión a distancia, se desarrollaron dando paso a las comunicaciones entre dispositivos móviles y creando así una necesidad de establecer un modelo que soportase los datos e información que se tenían que transmitir remotamente, surgiendo las radiocomunicaciones móviles. Este servicio comenzó con los sistemas privados de radio móvil en Estados Unidos y se popularizó su uso con el desarrollo de los servicios de Internet basados en las comunicaciones móviles, junto con la aparición del concepto celular.

Los sistemas de redes móviles celulares fueron evolucionando a lo largo de los años, desarrollándose en todo el mundo y con nuevas tecnologías en cada evolución, denominadas generaciones móviles. Como resumen, en la Tabla 2.1 se pueden observar las principales características de cada generación móvil desplegada hasta la actualidad desde la primera generación móvil, hasta los siguientes estándares que establecieron las sucesivas generaciones: GSM/GPRS, UMTS, LTE y 5G NR [4].

Generación	Años de despliegue inicial	Velocidad teórica de transmisión	Servicios
1G	1980s	2,4 Kbps	Solo voz
2G	1990s	64 Kbps	Datos empaquetados, voz digital
3G	2000s	2 Mbps	Audio de alta calidad integrado, video y datos
4G	2010s	200 Mbps a 1 Gbps	Acceso a información dinámica y diversamente
5G	2019 en adelante	1 - 10 Gbps	Equivalentes a 4G con capacidades para IA

Tabla 2.1: Evolución de las principales generaciones de redes móviles [4].

2.2. Fundamentos de las redes 5G

2.2.1. Principales aplicaciones de la tecnología 5G

Las redes móviles 5G suponen el último avance en las radiocomunicaciones tratando de dar servicio a las necesidades cada vez más exigentes de los usuarios. En especial, se centra en el avance y optimización de los recursos físicos a través del uso de nuevas

tecnologías, y la mejora de los servicios gracias a las indicaciones y estándares realizados y propuestos por los organismos del 3GPP o la *International Telecommunication Union* (ITU). Gracias a estos estándares, se pueden establecer tres servicios fundamentales que se plantean cubrir con esta generación [5] [6]:

- *Ultra reliable low latency communications* (URLLCs): consiste en dar cobertura a transmisiones de baja latencia con una alta fiabilidad para un determinado número de usuarios o terminales. Este servicio pretende cubrir aquellos casos de uso donde sea necesario un rápido nivel de respuesta con la mayor robustez en la comunicación como en situaciones de emergencia y alarma o en operaciones médicas a distancia.
- *Enhanced mobile broadband* (eMBB): consiste en ofrecer la máxima transmisión de datos posible para los dispositivos de la red garantizando una fiabilidad sólida. Con este servicio se trata de suplir las necesidades de las comunicaciones de gran ancho de banda o servicios de realidad aumentada (RA) y realidad virtual (RV).
- *Massive machine type communications* (mMTCs): consiste en el establecimiento y mejora de las comunicaciones entre los propios dispositivos. Gracias a este enfoque, se podrán explotar las propiedades y características de la conectividad de dispositivos y el desarrollo del *Internet of Things* (IoT).

Estos tres servicios sirven para establecer multitud de aplicaciones de uso para el 5G, y derivan de la idea principal de la arquitectura de red de esta generación basada en soportar la conectividad de datos y servicios heterogéneos usando técnicas avanzadas como la virtualización de la red y la definición a través de software de la misma [7].

Para poder cumplir con los estándares y proporcionar los servicios y aplicaciones que se han descrito, se puede establecer una serie de tecnologías que se aplican a esta generación y que también suponen un punto de inflexión para futuras generaciones actualmente en desarrollo [8].

En la Tabla 2.2 se pueden ver resumidas algunas de estas tecnologías que permiten el desarrollo de la quinta generación de redes móviles, actualmente en despliegue.

Nota: a partir de este punto, en este documento se va a trabajar con escalares, vectores y matrices, para los cuales se empleará una notación específica. Los escalares se representarán mediante letras minúsculas, como a . Los vectores se indicarán con letras minúsculas en negrita, como \mathbf{a} , donde $\|\mathbf{a}\|$ denota la ℓ_2 -norm del vector \mathbf{a} . Las matrices se denotarán mediante letras mayúsculas en negrita, como \mathbf{A} , donde $\text{tr}(\mathbf{A})$ denota la traza de la matriz \mathbf{A} . Además, los conjuntos estarán representados con letras caligráficas, como \mathcal{A} , donde $|\mathcal{A}|$ denota la cardinalidad del conjunto \mathcal{A} . Mediante los superíndices $(\cdot)^\top$, $(\cdot)^*$ y $(\cdot)^H$ que representarán los operadores matriciales de la transpuesta, conjugada y

Tecnología	Descripción
<i>Millimeter Waves</i> (mmWaves)	Transmisión de datos en bandas de más alta frecuencia ($30 \text{ GHz} \leq f \leq 300 \text{ GHz}$) en el espectro que permita una tasa de transmisión de datos mayor
<i>Full Duplex</i>	Uso de transceptores para transmitir y recibir datos de manera simultánea en la misma frecuencia
<i>Small Cells</i>	Distribución de estaciones base de mucho menor tamaño y consumo de energía formando una red densa para un uso eficiente del espectro
<i>Beamforming</i>	Ganancia en la transmisión y recepción de ondas de radio gracias a la directividad de las antenas que busca la maximización de la energía que se transmite y reducir la interferencia según el canal para cada dispositivo
Multiplexación espacial	Uso de un alto número de antenas (array) en la estación base de manera que se puedan transmitir la información de cada usuario individual separando sus flujos de datos espacialmente de manera escalable

Tabla 2.2: Ejemplos de tecnologías clave en 5G y sus descripciones [9] [1].

traspuesta conjugada (hermítica), respectivamente. El conjunto de números complejos se representará como \mathbb{C} y el operador esperanza se representará como $\mathbb{E}\{\cdot\}$. Una distribución Gaussiana compleja y simétrica circular con media $\boldsymbol{\mu}$ y matriz de covarianza $\boldsymbol{\Sigma}$ se representará como $\mathcal{CN}(\boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\Sigma})$. La matriz identidad de orden $N \times N$ se representará como \mathbf{I}_N .

2.2.2. *Massive MIMO*

Entre las tecnologías 5G mencionadas, este trabajo toma como base la técnica mMIMO, componente clave que habilita funcionalidades para el 5G gracias a la capacidad que otorga para manejar múltiples flujos de datos simultáneamente y reducir la interferencia entre las señales de los usuarios. Esta introducción previa es necesaria para el estudio en profundidad y la comprensión de la tecnología *cell-free massive MIMO* (CF-mMIMO), tema central de este trabajo.

El desarrollo de la tecnología mMIMO se centra en la mejora de las prestaciones para las redes celulares presentes y futuras, y consiste en equipar la estación base (*base station*, BS) con un número elevado de antenas de forma que pueda utilizar la diversidad espacial y poder transmitir diferente información a los usuarios de la celda (*user*, UE) usando los mismos recursos de tiempo y frecuencia. Esta mejora está relacionada con el hecho de solventar uno de los principales problemas que se encuentran a la hora de ofrecer una

mayor tasa de transmisión de datos para cada usuario o *throughput* en las comunicaciones inalámbricas, la limitación física de las telecomunicaciones [10].

Un parámetro importante del rendimiento en las redes celulares es la capacidad de tráfico por tiempo y unidad de área o *área throughput* que indica cuánto *throughput* puede soportar una zona concreta o celda en estos sistemas. Se puede modelar matemáticamente con la siguiente fórmula:

$$\text{Area throughput} = B \cdot D \cdot SE, \quad (2.1)$$

donde B es el ancho de banda disponible en hercios (Hz), D es la densidad celular promedio en celdas por kilómetro cuadrado ($cells/km^2$), y SE la eficiencia espectral por celda, es decir, la cantidad de información que es posible transmitir por segundo sobre un hercio de ancho de banda, medido en bits por segundo por hercio por celda ($bit/s/Hz/cell$). De esta forma, obtenemos un parámetro medible en gran parte de los sistemas celulares como el *area throughput*, cuyas unidades de medida son los bits por segundo por kilómetro cuadrado ($bit/s/km^2$).

De 2.1 se pueden identificar tres formas diferentes de aumentar la capacidad de la celda, siendo la eficiencia espectral uno de los parámetros más prometedores ya que no precisa de usar más recursos físicos como con el aumento del ancho de banda, ni de gastar en más infraestructura como con el aumento de la densidad celular [11].

La tecnología mMIMO consigue aumentar la SE del esquema celular gracias a que utiliza la técnica de acceso múltiple (*Space-Division Multiple Access*, SDMA) para dar cobertura a múltiples usuarios en la misma banda de frecuencia y tiempo, y reducir con esto la interferencia entre usuarios, además de mejorar la eficiencia energética (*energy efficiency*, EE) gracias al uso eficiente de los recursos, lo que permite que los UE puedan transmitir con menor potencia para comunicarse con la BS. En la Figura 2.1 se puede observar cómo la tecnología mMIMO aprovecha el acceso múltiple espacial para separar los flujos de los distintos usuarios.

En varios estudios sobre la tecnología mMIMO se destaca el uso de la técnica de duplexación por división de tiempo (*time-division duplexing*, TDD) para separar los dos canales generales que conforman un sistema celular: el enlace ascendente (*uplink*, UL), la transmisión de datos desde el dispositivo del usuario hacia la estación base, y el enlace descendente (*downlink*, DL), la transmisión de datos desde la estación base hacia el dispositivo del usuario. Esta técnica se utiliza para poder usar la misma información del estado del canal (*channel state information*, CSI) para ambos tráficos, información relevante para realizar la estimación del canal y poder aplicarla a la precodificación y *combining* (conformado de haz o filtrado) [11][12].

Además de las mejoras que se han mencionado, las redes que utilizan la tecnología mMIMO se benefician de dos características importantes de los canales multiantena y

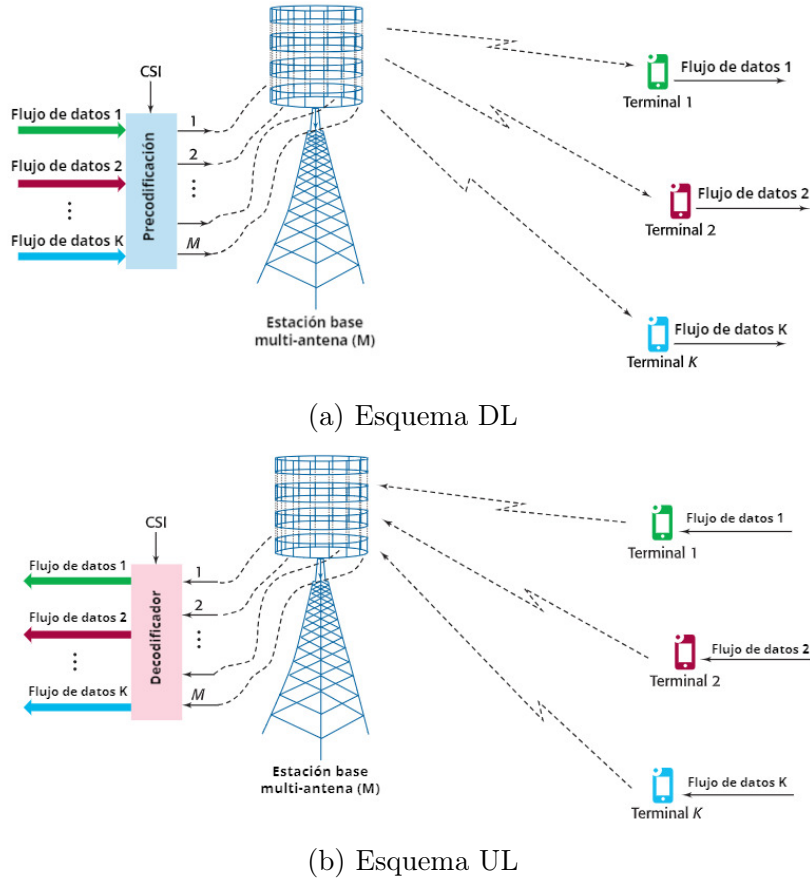


Figura 2.1: Esquemas de los flujos de datos DL y UL de un enlace mMIMO. Adaptado de [10]

que son especialmente relevantes para desafíos complejos como la estimación del canal, así como estar muy presentes en sistemas mMIMO donde se presume que $M \gg K$, donde M es el número de antenas de la estación base en el sistema y K el número total de usuarios que se sirven en una misma celda.

Estas características son el *channel hardening* y la *favorable propagation*, que se presentan normalmente en la mayoría de casos de estudio en los sistemas mMIMO. El primer fenómeno, permite que un canal aleatorio móvil (Rayleigh *fading channel*) se comporte como un canal determinista, lo que elimina la necesidad de combatir los desvanecimientos de pequeña escala y mejora la ganancia de estimación del canal DL. Mientras que el segundo fenómeno, permite que las direcciones de dos canales de UE sean asintóticamente ortogonales entre sí, lo que facilita la tarea de la BS para mitigar la interferencia entre los diferentes usuarios, lo que resulta en una mejora de la SE y permitiendo el uso de técnicas de precodificación y *combining* más sencillas [11][13].

Tras haber analizado algunas de las características fundamentales de la tecnología mMIMO, es sencillo entender su papel clave en el desarrollo de la quinta generación de redes móviles, y a su vez entender el por qué esta tecnología y su desarrollo tiene un gran

potencial para extenderse hacia las tecnologías para las redes *beyond* 5G [14]. Además, esta tecnología abre un abanico de posibilidades para implementar posibles soluciones que mejoren las prestaciones del mMIMO en diferentes escenarios y con nuevas formas de pensamiento sobre las redes celulares inalámbricas, es por ello que el siguiente apartado se centrará en una variante del mMIMO que hereda las ventajas de esta tecnología y es tema central de este TFG, la estrategia y uso de la tecnología *cell-free massive* MIMO (CF-mMIMO) o *distributed massive* MIMO (D-mMIMO).

2.3. *Cell-free massive* MIMO

El término *cell-free massive* MIMO se plantea por primera vez en la década de 2010 como un sistema distribuido mMIMO con un gran número de estaciones de servicio, repartidas en una amplia área y denominadas puntos de acceso (*access points*, APs), y un número mucho menor de usuarios autónomos, que son servidos por estos APs. Esta nueva forma de entender las estaciones base como puntos de acceso que cooperan a través de una red central de transporte (*backhaul network*) y los conecta al núcleo de la red, permitiendo que puedan trabajar conjuntamente para mejorar el servicio de la red de comunicación móvil y los usuarios, a través del uso de la tecnología de la capa física establecida en la capa de las redes celulares mMIMO [15].

Partiendo del modelo clásico celular, con grandes estaciones base y los usuarios alrededor de cada estación que les dan servicio dentro de las celdas, las redes *cell-free* abren un nuevo paradigma en las comunicaciones móviles donde la idea principal es aumentar los parámetros de mejora del tráfico de datos, debido a la actual demanda masiva, estableciendo que sean los propios APs los que rodeen al usuario y se comuniquen entre sí para otorgar el mejor servicio a cada UE. En la figura 2.2 se puede observar un esquema de la arquitectura de una red *cell-free* donde los usuarios tienen su conjunto de APs que les ofrecen servicio de manera coordinada a través de la información que recopilan y que se centraliza a través de *central processing units* (CPUs) y con enlace al núcleo o core de la red conectadas a través de la red *backhaul*.

2.3.1. Fundamentos y características de las redes *cell-free*

Considerando una red con L APs, cada uno equipado con N antenas y distribuidos a lo largo del área de cobertura, se puede definir el parámetro $M = N \cdot L$ como el número total de antenas en la red y donde los APs sirven conjuntamente a un número K de UEs totales. De esta forma, se puede establecer que la definición matemática sobre la que se fundamentan las redes CF-mMIMO como una red ultra-densa donde el número de antenas de los APs es mucho mayor que el número total de usuarios ($L \gg K \implies M \gg K$),

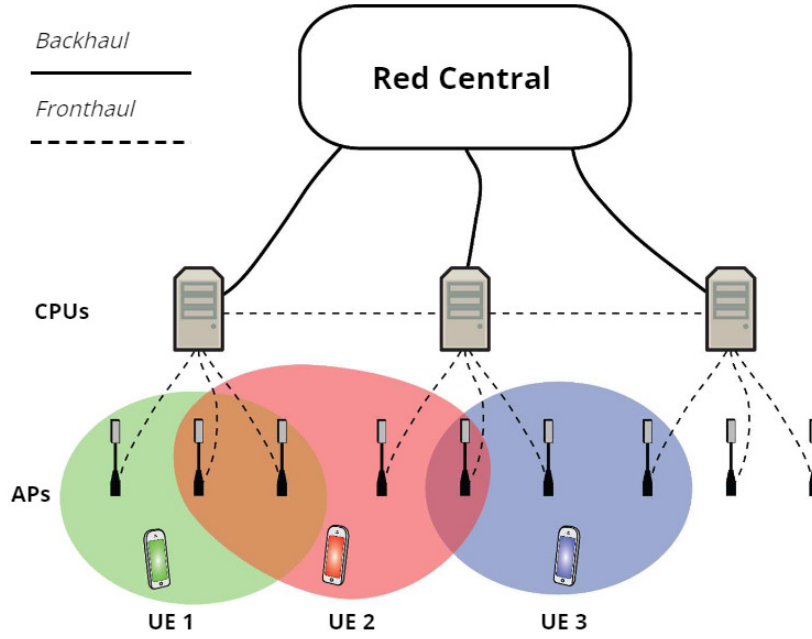


Figura 2.2: Modelo simple de las capas de una red *cell-free* con una red de acceso radio centralizada y basada en cloud computing. Adaptado de [16].

aunque los conceptos y escenarios de procesamiento que se van a plantear en el presente TFG son válidos para cualquier valor de L , K y M [16].

Este hecho plantea un problema a la hora de ofrecer el servicio CF-mMIMO para muchos usuarios en la práctica, ya que si seguimos la teoría de esta tecnología observaremos que si todos los APs atienden a todos los UEs, a medida que aumente el número de usuarios también lo tendría que hacer el número de APs, por lo que en la práctica se daría una situación insostenible. Con el objetivo de plantear una solución de manera acotada, un pilar importante sobre el que se van a fundamentar estas redes *cell-free* es en su escalabilidad, ya que para poder aplicarlas en un futuro a la evolución de las generaciones móviles es necesario que puedan operar y gestionar eficazmente un escenario con múltiples usuarios en escenarios reales. Por ello, este trabajo se centrará en un modelo de agrupación cooperativa *user-centric* para determinar los grupos de APs que dan servicio a cada UE [17] [18].

En base a esto, se puede establecer un marco de referencia para esta asociación denominado *dynamic cooperation clustering* (DCC), que establece que el k -ésimo usuario solo le darán servicio aquellos APs indexados incluidos dentro del conjunto $\mathcal{M}_k \subset \{1, \dots, L\}$ y que podrán cambiar dinámicamente según la movilidad del usuario. Partiendo de este marco, se define la matriz $\mathbf{D}_{kl} \in \mathbb{C}^{N \times N}$ para $k = 1, \dots, K$ y $l = 1, \dots, L$, que determina qué APs se comunican con qué usuarios variando sus valores entre la matriz identidad \mathbf{I}_N para los APs que pertenecen al subgrupo que da servicio al k -ésimo usuario o la matriz

nula $\mathbf{0}_N$ en caso contrario [19].

Teniendo como fundamento base los sistemas MIMO masivo, otro pilar fundamental se basa en utilizar la técnica de duplexación TDD para los canales UL y DL, que permite poder usar la misma CSI en un mismo bloque de coherencia de canal. Un bloque de coherencia es un bloque tiempo-frecuencia con una duración igual al tiempo de coherencia del canal y un ancho de banda igual al ancho de banda de coherencia, y establece los recursos para el sistema de comunicación en los que el canal entre emisor y receptor se puede describir como un escalar. Este enfoque permite simplificar los modelos de radiocomunicación, estableciendo T_c como el tiempo de coherencia del canal y B_c como el ancho de banda de coherencia del canal, de manera que siguiendo el teorema de Nyquist-Shannon, cualquier señal que se transmita en cada bloque de coherencia estará caracterizado por $\tau_c = T_c B_c$ muestras complejas, también llamados símbolos. Derivado de este parámetro, se puede definir el uso de los símbolos de transmisión τ_c de un bloque de coherencia según tres propósitos:

$$\tau_c = \tau_u + \tau_d + \tau_p, \quad (2.2)$$

siendo, τ_u los símbolos para transmitir datos en el UL, τ_d los símbolos para transmitir datos en el DL y τ_p los símbolos para la transmisión de los pilotos UL, respectivamente.

2.3.2. Capacidad de canal y eficiencia espectral

Al inicio del capítulo, se ha introducido la eficiencia espectral como uno de los métodos para poder aumentar el *throughput* de datos dentro de un área y poder ofrecer mejor servicio a los usuarios. Para comprender y definir mejor qué es la eficiencia espectral, que será la métrica que se utilizará para medir el rendimiento de los distintos casos que se propondrán a lo largo del TFG, se debe definir en profundidad qué es la capacidad de canal y cuál es su relación con la eficiencia espectral.

La capacidad de canal se modela detalladamente a partir de un esquema simple de comunicaciones donde la señal recibida, es una versión escalada de la señal deseada y ruido blanco aditivo Gaussiano (*additive white Gaussian noise*, AWGN) tras viajar a través del canal, denominados canales discretos sin memoria de ruido blanco aditivo Gaussiano.

Considerando un canal discreto sin memoria AWGN con señal de entrada $x \in \mathbb{C}$ y señal de salida $y \in \mathbb{C}$ cuya relación se expresa como:

$$y = hx + n, \quad (2.3)$$

donde $n \sim \mathcal{N}_{\mathbb{C}}(0, \sigma^2)$ es el ruido AWGN independiente. Considerando que la respuesta del canal $h \in \mathbb{C}$ es determinista y conocida a la salida, y la distribución de la señal de entrada x está limitada en potencia de forma que $E\{|x|^2\} \leq p$, se puede definir la capacidad del

canal como:

$$C = \log_2 \left(1 + \frac{p|h|^2}{\sigma^2} \right). \quad (2.4)$$

A partir de 2.4 podemos establecer que para cualquier SE más pequeña o igual que la capacidad, existe un esquema de codificación/decodificación que permite que se pueda alcanzar una probabilidad arbitrariamente baja de error en la transmisión [12][20].

Esta es la definición más básica de la capacidad en un canal de entrada única y salida única (*Single Input, Single Output, SISO*) determinista, ya que se envía una única señal de entrada y se recibe una señal de salida, y donde aparece una proporción muy importante en los sistemas de comunicaciones, la relación señal a ruido o (*signal-to-noise ratio, SNR*) de manera que:

$$\text{SNR} = \frac{\overbrace{p|h|^2}^{\text{Potencia de señal recibida}}}{\underbrace{\sigma^2}_{\text{Potencia de ruido}}}. \quad (2.5)$$

Un aspecto importante que no se ha tratado en las definiciones anteriores en torno a la capacidad es la existencia de interferencia con otras transmisiones y la aleatoriedad de los canales de comunicaciones en situaciones prácticas reales. Si se considera que el canal es una variable aleatoria que toma una nueva realización independiente por cada bloque de coherencia, se puede definir otro concepto de la capacidad denominado capacidad ergódica, es decir, que las propiedades estadísticas del canal son deducibles a partir del análisis de una única secuencia de realización, y son conocidas y se mantienen.

En función de estos aspectos, si se considera un canal discreto interferente sin memoria con señal de entrada $x \in \mathbb{C}$ y señal de salida $y \in \mathbb{C}$ cuya relación se expresa como:

$$y = hx + v + n, \quad (2.6)$$

donde $n \sim \mathcal{N}_{\mathbb{C}}(0, \sigma^2)$ es el ruido, la respuesta del canal $h \in \mathbb{C}$ se conoce en la salida, $v \in \mathbb{C}$ es la interferencia aleatoria con una distribución arbitraria que satisfaga una serie de condiciones¹ y la señal de entrada está limitada en potencia.

En vista de la expresión 2.6, podemos establecer el límite inferior para la capacidad ergódica del canal como:

$$C \geq \mathbb{E} \left\{ \log_2 \left(1 + \frac{p|h|^2}{\rho_v(h, u) + \sigma^2} \right) \right\}. \quad (2.7)$$

¹Suponiendo que el ruido n es independientemente condicional de v conocidas h y u (realización del canal y de una variable aleatoria que afecta a la varianza de la interferencia, respectivamente), si la interferencia v tiene media condicional cero (*i.e.*, $\mathbb{E}\{v|\mathbb{H} = h, \mathbb{U} = u\} = 0$) y la interferencia está condicionalmente incorrelada con la entrada (*i.e.*, $\mathbb{E}\{x * v|h, u\} = 0$)

En la ecuación 2.7 podemos ver que el límite inferior es una SE alcanzable y es una expresión similar a los casos determinísticos incorporando el cálculo de la esperanza sobre el logaritmo. La expresión que aparece dentro del argumento del logaritmo $\frac{p|h|^2}{\rho_v(h,u)+\sigma^2}$ se define como la relación señal a interferencia más ruido (*signal-to-interference-plus-noise ratio*, SINR) instantánea efectiva y depende de un parámetro de varianza condicional $\rho_v(h,u) = \mathbb{E}\{|v|^2|h,u\}$ que modela las interferencias aleatorias por otras transmisiones simultáneas y la incertidumbre del canal causado por errores de estimación del canal [16].

2.3.3. Escalabilidad y modelado

Como se ha mencionado anteriormente, la escalabilidad es un pilar fundamental en las redes *cell-free* ya que todos los APs deberían estar, en el modelo *cell-free* original, involucrados en el servicio de todos los UEs, pero esto en la práctica es imposible si se quiere formar la red para un alto número de usuarios. Se debe asegurar que la tecnología CF implantada puede soportar que aumente el número de APs y/o UEs sin aumentar infinitamente las capacidades para atender el servicio, y establecer soluciones para las principales problemáticas relacionadas con la escalabilidad como el procesamiento de datos, la topología de la red y el control de potencia [21].

Para saber si una red *cell-free* es escalable o no, se debe realizar un estudio del procesamiento de la señal para la estimación de canal, el procesamiento de la señal para recepción y transmisión, la señalización del fronthaul para datos y CSI, y la optimización de los recursos. Todas estas variables deben estar acotadas dentro de un rango conocido y finito tanto para su cómputo de recursos utilizados como la complejidad computacional cuando $K \rightarrow \infty$, de manera que el modelo establecido pueda ser implementable prácticamente para todos los APs.

Una condición suficiente para que se cumpla la escalabilidad, partiendo del modelo de CF-mMIMO, el esquema de asignación DCC y el hecho de utilizar la matriz \mathbf{D}_{kl} , podemos definir el conjunto \mathcal{D}_l de UEs servidos por el AP l como:

$$\mathcal{D}_l = \{i : \text{tr}(\mathbf{D}_{il}) \geq 1, i \in \{1, \dots, K\}\}. \quad (2.8)$$

A partir de la definición de este conjunto determinado en la ecuación 2.8, se puede establecer un teorema que establece que si el cardinal de este conjunto, $|\mathcal{D}_l|$, permanece finito cuando $K \rightarrow \infty$ para $l = 1, \dots, L$, entonces la red *cell-free* podrá ser escalable según los términos anteriormente mencionados, siempre y cuando la complejidad de los algoritmos de asignación de potencia cumpla la condición de limitación cuando los usuarios crecen teóricamente de manera infinita.

Para modelar el canal en la literatura de CF-mMIMO y mMIMO se hace uso de modelos de canal tanto deterministas como estocásticos. Los primeros se usan para situaciones

determinadas cuando se está ante escenarios donde hay una componente significativa en el canal por rayo directo entre el transmisor y receptor, es decir, cuando existe *line-of-sight* (LoS); mientras que los últimos son mayormente utilizados gracias a que abarcan una gran cantidad de casos menos dependientes del entorno de propagación.

En general, se ha estado considerando un modelo estocástico basado en el desvanecimiento Rayleigh incorrelado para comunicaciones donde no hay LoS y donde el canal entre el AP l y el UE k se puede expresar como una distribución normal compleja de forma que $\mathbf{h}_{kl} \sim \mathcal{N}_{\mathbb{C}}(\mathbf{0}_N, \beta_{kl} \mathbf{I}_N)$. Este canal se modela así gracias al teorema del límite central con una distribución normal, por la adición de todas las magnitudes que conforman \mathbf{h}_{kl} que siguen una distribución Rayleigh, lo que hace que cada realización modele las pérdidas por desvanecimiento de pequeña escala y la varianza conjunta β_{kl} las pérdidas por desvanecimiento a gran escala, como el *pathloss* y *shadowing* (zonas en las que, por características del entorno, el canal no es suficientemente aceptable para transmitir correctamente las señales) [11].

Pero el uso de este modelo se ha puesto en el punto de mira durante los últimos años debido a que en mediciones prácticas de este sistema se ha visto que no tener en cuenta la correlación espacial entre los elementos que conforman el vector canal hace que no se tengan en cuenta fenómenos como la predisposición de algunas direcciones entre el UE y el AP que poseen una mayor contribución a la correcta transmisión de las señales.

Por este motivo, en recientes estudios se han capturado las características de la correlación espacial a través del modelo de desvanecimiento Rayleigh correlado, que se considera adecuado para la trazabilidad en cuanto a la realización de los cálculos analíticos y es apto para modelar canales sin LoS con numerosas propagaciones multicamino. Para este modelo, el canal entre el AP l y el UE k se puede formular como:

$$\mathbf{h}_{k,l} \sim \mathcal{N}_{\mathbb{C}}(\mathbf{0}_N, \mathbf{R}_{kl}), \quad (2.9)$$

donde se puede ver que aparece una matriz $\mathbf{R}_{kl} \in \mathbb{C}^{N \times N}$ que se define como la matriz de correlación espacial entre el AP l y el UE k , y describe las pérdidas por desvanecimiento a gran escala como lo hacía β_{kl} en el modelo incorrelado. Gracias a esto, podemos establecer una relación entre ambos parámetros de forma que:

$$\beta_{kl} = \frac{1}{N} \text{tr}(\mathbf{R}_{kl}), \quad (2.10)$$

haciendo que este parámetro β_{kl} sea la ganancia media del canal entre el AP l y el UE k .

2.4. *Multicast en Cell-free massive MIMO*

2.4.1. Introducción a las transmisiones *multicast* en comunicaciones móviles

En cualquier comunicación móvil se suelen establecer modelos en los que un transmisor envía información a un receptor, denominadas comunicaciones punto a punto (*point-to-point*, PTP); pero otra cuestión clave dentro de las comunicaciones móviles son las comunicaciones punto a multipunto (*point-to-multipoint*, PTM) de manera que los paquetes de datos sean transmitidos simultáneamente de un transmisor a varios receptores.

Dentro de estos tipos de comunicación, se pueden establecer tres esquemas para el envío de información: *unicast*, *multicast* y *broadcast*. El primero de estos métodos se refiere a la simple transferencia de información PTP entre un único transmisor y un único receptor, mientras que los otros dos se refieren a comunicaciones PTM [22].

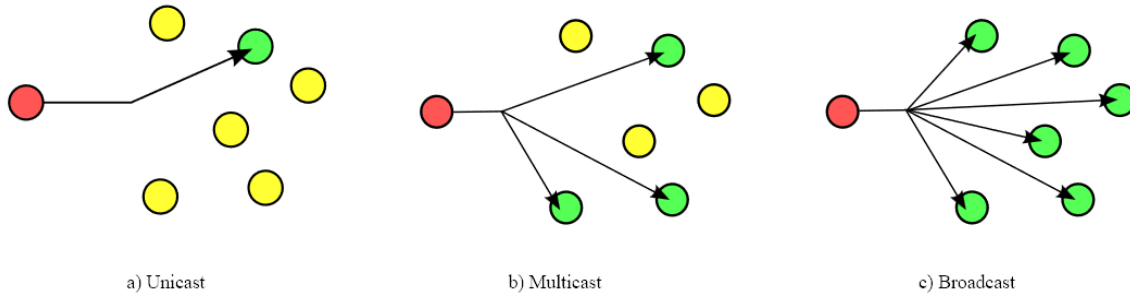


Figura 2.3: Representación esquemática de los distintos modelos de comunicación. Adaptado de [23].

La diferencia principal entre los dos modelos PTM radica en la forma de distribuir la información entre los receptores. La transmisión *broadcast* se refiere al envío de la misma información general para todos los usuarios que existen en la red, mientras que la transmisión *multicast* abarca el hecho del envío de información a determinados grupos de usuarios particulares.

El modelo de comunicación *multicast* cubre varias de las necesidades en la actualidad ya que permite que se transmitan diferentes tipos de información a cada grupo de receptores dependiendo de los servicios que necesiten. Además de este hecho, la transmisión *multicast* es bastante relevante ya que evita la transmisión de múltiples señales con la misma información, hace un mejor uso de los recursos utilizando únicamente una única señal para dar servicio a varios usuarios sin comprometer la calidad del servicio (*quality of service*, QoS) y disminuye la carga de procesamiento de los transmisores.

Este tipo de transmisión se empezó a utilizar con el surgimiento de los primeros servicios de Internet para las comunicaciones móviles, estableciendo una estandarización y capacidades mínimas por el 3GPP a principios de la década de los 2000. Este proyecto definió la arquitectura y protocolos del *Multimedia Broadcast and Multicast Service* (MBMS) para soportar casos de *broadcast/multicast* para redes 3G.

Desde entonces, las siguientes generaciones 4G y 5G han especificado en sus distintas *releases* especificaciones técnicas y de arquitectura que soporten estos tipos de servicios. Para la cuarta generación se estableció el *evolved* MBMS que se beneficia y mejora gracias a las nuevas técnicas que se implementaron con LTE, como la multiplexación por división de frecuencias ortogonales y la agregación de portadoras; y para la quinta generación, en la *release* 17, el 3GPP estableció las mejoras en arquitectura dentro del uso de NR para soportar servicios *multicast* denominándose esta mejora como *multicast and broadcast service* (MBS) [23][24].

2.4.2. Multicast en MIMO masivo y CF-mMIMO

Con el objetivo de mejorar las transmisiones multicast en las generaciones móviles posteriores, como se ha mencionado previamente, los requisitos y especificaciones técnicas de cada una de ellas se han utilizado en beneficio de esta mejora.

El mMIMO y su variante CF-mMIMO, tema central de este trabajo, han sido recientemente objeto de estudio para este tipo de casos *multicast* de manera que se puedan ofrecer distintos tipos de servicios con QoS flexibles para generaciones móviles como las redes 5G, así como futuras generaciones. En redes MIMO masivo se ha establecido el *multicast* como una forma prometedora de atender a servicios que requieran grandes flujos de datos, haciendo uso de sus características y a través del *beamforming* para dar servicio a los grupos multicast [25][26].

Se han establecido varios estudios que intentan mejorar estas prestaciones de los sistemas MIMO masivo para proveer un servicio *multicast* favorable utilizando distintas técnicas de acceso múltiple como el *non-orthogonal multiple access* (NOMA) para, haciendo uso además del mMIMO, aumentar la capacidad obtenible en el sistema para cancelar la interferencia del receptor *intra-cluster*, es decir, la interferencia de los propios usuarios que comparten el mismo conjunto *multicast* [27].

También se puede observar cómo se ha estudiado el uso de esquemas de codificación y modulación (*modulation and coding schemes*, MCSs) diferentes, debido a que la mayoría de técnicas de MCS para *multicast* son conservadoras (ej.: utilizando al usuario con peores condiciones de canal dentro del grupo de referencia) y se eligen a través del uso de indicadores de calidad del canal (*channel quality indicators*, CQIs), se establecen técnicas MCS que utilicen de referencia CQIs subbanda para mejorar la eficiencia espectral sin

comprometer la robustez del canal. Así como la revisión de una precodificación mediante bloques de recursos espacio-tiempo que permitan disminuir el desperdicio de los recursos en el DL y la interferencia por pilotos para los casos PTM [28][29].

3

MODELADO Y ANÁLISIS: PRECODIFICACIÓN

En este tercer capítulo se presenta el modelado matemático y parámetros clave en la definición matemática para los casos de precodificación en estudio. En la sección 3.1, se define el modelo matemático de sistema y canal sobre el que se va a realizar el estudio en casos CF-mMIMO para multicast. Por último, en la sección 3.2, se establece un modelo y ecuaciones para definir matemáticamente los tres tipos de precodificadores que se van a utilizar.

3.1. Modelado analítico y matemático

3.1.1. Modelo del sistema y canal

Para poder alcanzar los objetivos planteados en este TFG, es necesario, previamente a la realización de las simulaciones y planteamiento de escenarios, tener un conocimiento profundo sobre las bases matemáticas y de telecomunicaciones que entran en juego para los casos que se van a estudiar. En la sección 2.3.1 ya se han avanzado algunos de los parámetros, conjuntos y ecuaciones que serán similares a las que se utilizarán para los distintos casos de estudio, pero que en el presente trabajo se han llevado a cabo considerando un sistema CF-mMIMO que opera en TDD y cuyas ecuaciones tanto de canal, como de asignación de pilotos o precodificación DL se han adaptado también para los casos en los que se realice agrupación de usuarios en subgrupos para el envío de información *multicast*.

Se considera un sistema CF-mMIMO donde L APs, equipados con N antenas cada uno, y que realizan comunicaciones entre ellos por medio de enlaces *fronthaul* a una CPU principal, y hacia un grupo determinado de K usuarios con una única antena. El conjunto de usuarios se denotará como $k \in \mathcal{K} = \{1, \dots, K\}$, y el conjunto de APs como $l \in \mathcal{L} = \{1, \dots, L\}$, utilizando un marco TDD dividido únicamente en una fase de entrenamiento de pilotos UL y una fase de transmisión de datos útiles DL con un tamaño $\tau_c = \tau_p + \tau_d$ ¹.

Para el estudio de los efectos de la transmisión *multicasting* en el entorno de la tecnología CF-mMIMO, se define el número total de subgrupos como G y el conjunto de subgrupos como \mathcal{G} , haciendo que los subgrupos sean indexados como $g \in \mathcal{G} = \{1, \dots, G\}$. De esta forma, y agregando con las definiciones establecidas en el párrafo anterior, el conjunto de usuarios dentro del subgrupo g se denota como \mathcal{K}_g ; y estableciendo el número de usuarios como $K_g = |\mathcal{K}_g|$, donde se cumple que $K = \sum_{g=1}^G K_g$.

Ajustando los parámetros definidos en [16] y sobre la transmisión *user-centric* y el marco DCC utilizados en los estudios previos sobre CF-mMIMO, se puede definir un subconjunto de APs que sirven a cada subgrupo g como $\mathcal{L}_g \subseteq \{1, \dots, L\}$, donde $|\mathcal{L}_g| = L_g \leq L$. En la Figura 3.1 se muestra una representación esquemática de una red CF-mMIMO, análoga a la que se plantea en el presente trabajo, con agrupación de usuarios para la transmisión y el uso de clústeres de APs cooperativos.

De manera análoga, y para simplificar la comprensión de las definiciones de las siguientes secciones, se define el conjunto \mathcal{S}_g como la colección de los subgrupos *multicast*

¹Se ha omitido el bloque de transmisión de datos UL dentro del tamaño de los bloques de coherencia (τ_u), ya que el presente trabajo se centra en el análisis y comparación de diversas técnicas de *multicasting*, que se realiza siempre en el DL, por lo que se excluye el estudio de la etapa UL

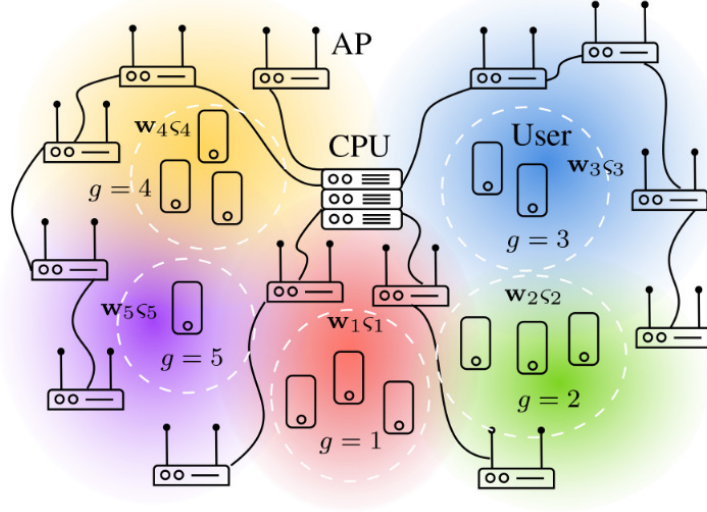


Figura 3.1: Esquema de red CF-mMIMO con agrupación de usuarios y cooperación de APs en clúster. Adaptado de [30].

que atienden algunos de los APs que atienden al subgrupo g ; y se define el conjunto de subgrupos multicast atendidos por el AP l como \mathcal{D}_l , establecido en la ecuación 2.8.

Continuando con lo establecido en el capítulo 2.4, se puede justificar, dada la separación física razonable entre los APs y los usuarios, que los vectores de canal de distintos pares usuario-AP son independientes, por lo que, considerando el desvanecimiento de pequeña escala, se cumple que $\mathbb{E}\{\mathbf{h}_{k'l'}\mathbf{h}_{kl}^H\} = \mathbf{0}_{N \times N}$, $\forall k'l' \neq kl$.

Así, el canal del usuario k para todo el conjunto de APs $l \in \mathcal{L}$, es $\mathbf{h}_k = [\mathbf{h}_{k1}^T, \dots, \mathbf{h}_{kL}^T]^T$, y se distribuye como una función $\mathbf{h}_k \sim \mathcal{N}_{\mathbb{C}}(\mathbf{0}_{LN}, \mathbf{R}_k)$, donde $\mathbf{R}_k = \text{blkdiag}(\mathbf{R}_{k1}, \dots, \mathbf{R}_{kL}) \in \mathbb{C}^{LN \times LN}$ es la matriz de covarianza espacial asociada al usuario k .

Las matrices de covarianza \mathbf{R}_{kl} , $\forall k \in \mathcal{K}$, $\forall l \in \mathcal{L}$, se pueden estimar en cada AP sobre un escenario con desvanecimiento a gran escala como el planteado en el trabajo, ya que estas matrices cambian lentamente en comparación con las realizaciones de los canales, y por ello, se consideran conocidas perfectamente tanto en los APs como en la CPU, mejorando de manera considerable el rendimiento del sistema [31].

3.1.2. Marco de agrupación de usuarios

Una vez establecido el modelo del sistema y del canal, se necesita establecer una visión general de lo que se va a realizar para el estudio de este trabajo. A la vista del establecimiento de una única transmisión multicast para cada subgrupo, se considera que los usuarios que experimenten características a gran escala del canal, compartan los recursos de transmisión eficientemente. Por ende, en [32] se establece un algoritmo basado

en *k-means* que utiliza una métrica simplificada en función de los vectores de ganancia media de canal $\beta_k = [\beta_{k1} \dots \beta_{Lk}]^\top$, que se tratan como vectores con características propias para cada usuario k , para fraccionar a los usuarios en grupos con la finalidad de minimizar los efectos de la contaminación de pilotos.

En el presente trabajo se realiza una adaptación para utilizar un algoritmo para agrupar a los usuarios usando el número de subgrupos multicast G que se van a generar y los vectores métrica β_k que se han definido en el párrafo anterior para los K usuarios en la red. Esta nueva métrica para medir la distancia entre dos vectores β_k se denomina *cosine similarity*, y se define como:

$$f_d(\beta_k, \beta_{k'}) = \frac{\beta_k^\top \beta_{k'}}{\|\beta_k\| \|\beta_{k'}\|}. \quad (3.1)$$

El valor de $f_d(\beta_k, \beta_{k'})$ en este contexto varía desde 0, lo que indica que ambos vectores métrica son ortogonales o no correlados entre sí, a 1, lo que significa que son vectores iguales. De esta forma se podrá formar el conjunto de subgrupos \mathcal{K}_g para $g \in \{1, \dots, G\}$, donde se agruparán a los usuarios cuyas distancias sean cercanas a la unidad (*i.e.*, los usuarios se encuentran geográficamente cerca), mitigando así de manera directa la contaminación de pilotos inter-subgrupos y mejorando la calidad de estimación de canal y efectividad de la precodificación [30].

En relación a la asignación de pilotos, se tiene en cuenta que la longitud de la secuencia piloto es de τ_p , por lo que se pueden generar como máximo τ_p secuencias piloto mutuamente ortogonales, que se asignarán a todos los usuarios dentro de un mismo subgrupo. Con esta asignación, cada subgrupo estará definido con su propia secuencia piloto y separado del resto de subgrupos, mientras que dentro de cada subgrupo, todos los usuarios compartirán la misma secuencia.

Este establecimiento de los pilotos disponibles en base a los subgrupos que se tienen en el escenario, presenta un problema de optimización combinatoria cuya complejidad crece exponencialmente a medida que aumenta el número de subgrupos. Para poder solventar esta problemática y la asociación sobre qué APs van a servir a qué subgrupos, se establece un algoritmo derivado del propuesto en [16] basado en la asignación de pilotos a subgrupos siguiendo el criterio de selección para cada subgrupo, en cada iteración, del piloto con la mínima contaminación entre pilotos de aquellos que ya están establecidos en el escenario.

Este trabajo se basará principalmente en las prestaciones y estudio de la agrupación en subgrupos de usuarios para realizar una transmisión multicast para todos los usuarios pertenecientes al mismo subgrupo g . Se fundamenta entonces en la transmisión de datos DL *subgroup-centric*, donde se realiza una partición efectiva de los usuarios que experimenten condiciones de propagación estadísticas similares, en contraposición del planteamiento *user-centric* de las transmisiones *unicast*, y el planteamiento *group-centric*

relativo a la transmisión *multicast* convencional (*i.e.*, la transmisión *multicast* pura, donde se envía la misma información para todos los usuarios del servicio *multicast*).

Partiendo de esta idea, resulta lógico transmitir un flujo de datos diferente para cada uno de los grupos, llegando a utilizar tantas transmisiones multicast como subgrupos G tenga el escenario. Así, se define la señal DL recibida por el usuario k en el subgrupo g como se indica en la ecuación 3.2:

$$y_k = \sum_{l=1}^L \mathbf{h}_{lk}^H \mathbf{D}_{lg} \mathbf{w}_{lg} \varsigma_g + \sum_{l=1}^L \sum_{\substack{c=1 \\ c \neq g}}^G \mathbf{h}_{lk}^H \mathbf{D}_{lc} \mathbf{w}_{lc} \varsigma_c + n_k, \quad (3.2)$$

donde $n_k \sim \mathcal{N}_{\mathbb{C}}(0, \sigma_d^2)$ es el ruido AWGN en el caso del usuario k , $\mathbf{w}_{lg} \in \mathbb{C}^N$ representa el vector de precodificación, dentro de aquellos precodificadores objeto de este estudio que analizaremos más adelante, y ς_g describe los símbolos de datos establecidos para todos los usuarios en el subgrupo g , con $\mathbb{E}\{|\varsigma_g|^2\} = 1$, y $\mathbb{E}\{\varsigma_g \varsigma_c^*\} = 0$, $\forall g \neq c$. Asimismo, en la ecuación 3.3 se define el conjunto de matrices diagonales auxiliares que representan la relación entre los APs y los subgrupos que sirven cada uno, para todos los $l \in \{1, \dots, L\}$ y $g \in \{1, \dots, G\}$.

$$\mathbf{D}_{lg} = \begin{cases} \mathbf{I}_N, & \text{si } l \in \mathcal{L}_g \\ \mathbf{0}_{N \times N}, & \text{resto} \end{cases}. \quad (3.3)$$

En la ecuación 3.2 se observa cómo el primer término de la suma define la señal deseada para el usuario k en el subgrupo g , mientras que el segundo término es la interferencia proveniente de la información enviada al resto de subgrupos.

Finalmente, basándose en la premisa de las operaciones CF-mMIMO que dictaminan que los usuarios basan su información del canal en una aproximación del mismo en la precodificación DL (y no en CSI exacta), se puede definir un componente del canal efectivo DL ϱ_{kl}^{gc} desde cada AP l al usuario k en el subgrupo g precodificado dentro del subgrupo c , como se observa en la ecuación 3.4.

$$\varrho_{kl}^{gc} = \mathbf{h}_{kl}^H \mathbf{D}_{lc} \mathbf{w}_{lc}, \quad k \in \mathcal{K}_g. \quad (3.4)$$

Con este parámetro definido, se puede determinar una aproximación al CSI instantáneo a través de la esperanza estadística como $\sum_{l=1}^L \mathbb{E}\{\varrho_{kl}^{gg}\}$ y, por ende, obtener una expresión de la SINR efectiva para el usuario k como:

$$\gamma_k = \frac{\left| \sum_{l=1}^L \mathbb{E}\{\varrho_{kl}^{gg}\} \right|^2}{\sum_{c=1}^G \mathbb{E}\left\{ \left| \sum_{l=1}^L \varrho_{kl}^{gc} \right|^2 \right\} - \left| \sum_{l=1}^L \mathbb{E}\{\varrho_{kl}^{gg}\} \right|^2 + \sigma_d^2}. \quad (3.5)$$

Con la expresión para la SINR en la ecuación 3.5, es sencillo expresar la ecuación de una SE alcanzable para el caso DL de un usuario k cualquiera en un subgrupo g :

$$\xi_k = (1 - \tau_p/\tau_c) \log_2(1 + \gamma_k). \quad (3.6)$$

La expresión para la SE alcanzable mostrada en la ecuación 3.6 es aplicable para cualquier esquema de precodificación y enfoque en DCC *multicast*, por lo que será la base que se utilizará en el presente trabajo para obtener los resultados. Asimismo, también se debe tener en cuenta que, para los casos de transmisión *multicast* en subgrupos, cada subgrupo de usuarios será servido con una única transmisión *multicast*, por lo que el criterio que se seguirá para determinar la SE alcanzable del subgrupo g estará limitada por aquella SE alcanzable por el peor usuario que pertenezca al subgrupo, y que se puede expresar como se indica en la ecuación 3.7.

$$\Xi_g = \min_{k \in \mathcal{K}_g} \xi_k. \quad (3.7)$$

3.2. Precodificadores distribuidos para CF-mMIMO

Dentro del contexto de las redes CF-mMIMO, la precodificación se presenta como uno de los elementos clave para la correcta y eficiente transmisión de los datos desde los APs hacia los distintos usuarios. En este contexto, juegan un papel determinante a la hora de dirigir las señales para todos los usuarios servidos por cada AP de manera que la calidad de la señal recibida sea la máxima posible y se obtenga una SE elevada, siendo la búsqueda de esta última algo clave para los escenarios que se van a analizar en el capítulo 4, tanto con usuarios uniformemente repartidos, como con usuarios distribuidos en clústeres espaciales por todo el escenario.

El presente trabajo se centrará en tres tipos diferentes de precodificadores para la transmisión de datos DL con un enfoque distribuido: *conjugate beamforming* (CB), *normalized conjugate beamforming* (NCB) y *enhanced conjugate beamforming* (ECB). La principal característica de operar en el DL de forma distribuida es el hecho de reducir la carga de trabajo de la CPU, dejando que la mayor parte del procesamiento se realice en cada uno de los propios APs que conforman el escenario, diseñándose de forma que utilicen CSI de manera local y explotando las propiedades de reciprocidad del canal gracias a operar en modo TDD [33][34].

Los tres tipos de precodificadores se fundamentan en el uso de la información de canal que les transmiten desde los APs de manera local, para la construcción de los vectores de precodificación, pero diferenciándose en la manera de normalizar estos vectores y tomando en consideración distintos parámetros a la hora de construir estos vectores.

En el caso del CB, se trata del precodificador distribuido más simple, tanto computacionalmente como en la propia forma de generar los vectores de precodificación para

las señales. La mayor parte del procesamiento con este tipo de precodificador se realiza localmente en los APs, sin necesidad de intercambiar información del estado del canal (*channel state information*, CSI) instantánea entre los APs o entre la unidad central de procesamiento. La principal motivación para usar este precodificador se basa en utilizarlo como punto de partida para comparar los otros precodificadores que se van a estudiar, además de haber presentado buenos resultados para su uso en escenarios *multicast* dentro de la literatura [35][36].

$$\mathbf{w}_{gl} = \sqrt{\rho_{gl}} \frac{\mathbf{v}_{gl}}{\sqrt{\mathbb{E} \{ \|\mathbf{v}_{gl}\|^2 \}}}. \quad (3.8)$$

Como paso previo al estudio de los vectores de precodificación, en la ecuación 3.8 se presenta el vector virtual de *combining* que sirve para su uso en el UL y para conformar el vector de precodificación para CB y los vectores de sus dos variantes que se van a estudiar en el trabajo.

$$\mathbf{v}_{gl}^{CB} = \hat{\mathbf{h}}_l^g. \quad (3.9)$$

De esta manera, en la ecuación 3.9 se presenta el vector virtual de *combining* \mathbf{v}_{gl}^{CB} para el precodificador CB. Este vector se define simplemente igualando su valor al vector de estimación del canal $\hat{\mathbf{h}}_l^g$ para cada subgrupo g , y de esta manera evitar inversiones de matrices con el aumento en la complejidad que conllevaría llevar a cabo este procesamiento para la precodificación.

Para poder obtener el valor del canal estimado $\hat{\mathbf{h}}_l^g$, se parte del hecho de que el vector del canal se trata de una combinación lineal de los canales entre todos los usuarios *multicast* dentro del subgrupo g para el AP l definido en la ecuación 3.10

$$\mathbf{h}_l^g = \frac{\sqrt{\tau_p \rho_p}}{K_g} \sum_{k \in \mathcal{K}_g} \mathbf{h}_{kl} \longrightarrow \mathbf{h}_l^g \sim \mathcal{CN} \left(\mathbf{0}_N, \overbrace{\frac{\tau_p \rho_p}{K_g^2} \sum_{k \in \mathcal{K}_g} \mathbf{R}_{kl}}^{\boldsymbol{\theta}_l^g} \right). \quad (3.10)$$

Asimismo, se define el vector de estimación de canal, y su distribución, en la ecuación 3.11.

$$\hat{\mathbf{h}}_l^g = \mathbb{E} \left\{ \mathbf{h}_l^g \mathbf{y}_{p_{lg}}^H \right\} \left(\mathbb{E} \left\{ \mathbf{y}_{p_{lg}} \mathbf{y}_{p_{lg}}^H \right\} \right)^{-1} \mathbf{y}_{p_{lg}} \triangleq K_g \boldsymbol{\theta}_l^g \boldsymbol{\gamma}_g^{-1} \mathbf{y}_{p_{lg}} \longrightarrow \hat{\mathbf{h}}_l^g \sim \mathcal{CN} (\mathbf{0}_N, K_g^2 \boldsymbol{\theta}_l^g \boldsymbol{\gamma}_g^{-1} \boldsymbol{\theta}_l^g). \quad (3.11)$$

Continuando entonces con la obtención de los vectores de precodificación, definidos bajo la ecuación general en (3.8), para el cálculo de la esperanza matemática de \mathbf{v}_{gl}^{CB} , se puede calcular como se muestra en la ecuación 3.12.

$$\mathbb{E} \left\{ \|\mathbf{v}_{gl}^{CB}\|^2 \right\} = \mathbb{E} \left\{ \|\hat{\mathbf{h}}_l^g\|^2 \right\} = \text{tr}(K_g^2 \boldsymbol{\theta}_l^g \boldsymbol{\gamma}_g^{-1} \boldsymbol{\theta}_l^g), \quad (3.12)$$

donde K_g^2 es el cuadrado del número de usuarios en el subgrupo g , y $\boldsymbol{\theta}_l^g$ y $\boldsymbol{\gamma}_g^{-1}$, que se trata de vectores que dependen de las condiciones del canal y vienen dados por las fluctuaciones a gran escala del mismo.

Una vez se ha definido el vector virtual de *combining*, el vector de precodificación para el CB, \mathbf{w}_{gl}^{CB} , usado por el AP l para transmitir a los usuarios en el subgrupo g se define como se expone en la ecuación 3.13

$$\mathbf{w}_{gl}^{CB} = \sqrt{\rho_{gl}^{DL}} \frac{\hat{\mathbf{h}}_l^g}{\sqrt{\text{tr}(K_g^2 \boldsymbol{\theta}_l^g \boldsymbol{\gamma}_g^{-1} \boldsymbol{\theta}_l^g)}}, \quad (3.13)$$

donde ρ_{gl}^{DL} es un factor de asignación de potencia (que varía según la estrategia que se haya seguido para el modelado).

Pero el hecho de utilizar el precodificador CB, cuyo coste computacional es muy bajo pero con prestaciones decentes, hace que no se maximicen algunas de las características específicas de los escenarios, por ejemplo, no mejorando y explotando la característica de endurecimiento de canal (*channel hardening*) [37]. Este precodificador, por ende, está bien para tomarlo de referencia dentro de los precodificadores distribuidos, pero si se quieren conseguir mejores prestaciones se puede recurrir a modelos más avanzados como el NCB.

Para el precodificador NCB, va un paso más allá que el CB y muestra los beneficios de normalizar el vector de precodificación, como se indica en la ecuación 3.14, consiguiendo reducir la incertidumbre en el DL debido a la falta de CSI en el usuario y mejora la ganancia del canal efectivo cuando el número de antenas en los APs se mantiene moderado [38].

$$\mathbf{v}_{gl}^{NCB} = \frac{\hat{\mathbf{h}}_l^g}{\|\hat{\mathbf{h}}_l^g\|}. \quad (3.14)$$

Con respecto a la fórmula en la que se basa el presente trabajo, tanto para la explicación teórica del presente capítulo como para la simulación práctica que se llevará a cabo según lo presentado en el capítulo 4, sobre el vector de precodificación NCB, se define como se indica en la siguiente ecuación:

$$\mathbf{w}_{gl}^{NCB} = \sqrt{\rho_{gl}} \frac{\mathbf{v}_{gl}^{NCB}}{\sqrt{\mathbb{E} \left\{ \|\mathbf{v}_{gl}^{NCB}\|^2 \right\}}} = \sqrt{\rho_{gl}} \frac{\mathbf{v}_{gl}^{NCB}}{\sqrt{\mathbb{E} \left\{ \left\| \frac{\hat{\mathbf{h}}_l^g}{\|\hat{\mathbf{h}}_l^g\|} \right\|^2 \right\}}} = \sqrt{\rho_{gl}} \frac{\hat{\mathbf{h}}_l^g}{\|\hat{\mathbf{h}}_l^g\|}. \quad (3.15)$$

En la ecuación 3.15 se observa cómo la fórmula cerrada para el precodificador NCB, involucra mayor conocimiento del canal, dado por el aumento en las prestaciones que hacen que la ganancia del canal se vuelva más determinista y, por tanto, puedan usar este hecho los diversos APs del escenario distribuido para mejorar el servicio de los usuarios.

Por último, el precodificador que presenta prestaciones más avanzadas para servicios *unicast* y distribución uniforme de usuarios [39], y que se tendrá en cuenta para el análisis de este trabajo es el ECB. Este precodificador proporciona el mayor endurecimiento del canal frente a todas sus variantes ya estudiadas, por lo que mejora la estabilidad del sistema y permite una mejor decodificación de los datos; además, proporciona una mayor eficiencia espectral en comparación con NCB y CB en ciertos escenarios donde hay un número mayor de antenas disponibles para los APs.

Para definir el vector de precodificación para ECB en el caso *multicast*, se presenta en la ecuación 3.16, el vector virtual de *combining*, que se basa en la estimación del canal normalizada por su norma al cuadrado; por lo que este precodificador tiene una complejidad computacional mayor a cualquiera de los otros precodificadores que se han expuesto. Aunque este hecho también hace que se consiga el mayor endurecimiento del canal, haciendo que la ganancia del canal sea un parámetro casi determinista y, por ende, facilitando los métodos de decodificación de datos basándose en estadísticos del canal más fiables [39].

$$\mathbf{v}_{gl}^{ECB} = \frac{\hat{\mathbf{h}}_l^g}{\|\hat{\mathbf{h}}_l^g\|^2}. \quad (3.16)$$

En la ecuación 3.17 se presenta, como en los anteriores casos, una ecuación para el desarrollo del precodificador ECB y su vector de precodificación, aunque cabe destacar que en el caso de este precodificador no se trata de una fórmula cerrada por el cálculo de la esperanza, y por este hecho se trata del precodificador que usaremos con mayor complejidad computacional al necesitar usar el método de Monte Carlo para obtener el vector que se utilizará para llevar a cabo las simulaciones.

$$\mathbf{w}_{gl}^{ECB} = \sqrt{\rho_{gl}} \frac{\mathbf{v}_{gl}^{ECB}}{\sqrt{\mathbb{E} \left\{ \|\mathbf{v}_{gl}^{ECB}\|^2 \right\}}} = \sqrt{\rho_{gl}} \frac{\hat{\mathbf{h}}_l^g}{\|\hat{\mathbf{h}}_l^g\|^2 \cdot \mathbb{E} \left\{ \frac{1}{\|\hat{\mathbf{h}}_l^g\|^2} \right\}}. \quad (3.17)$$

4

SIMULACIÓN Y EVALUACIÓN DE RESULTADOS

En este cuarto capítulo se presentan los resultados obtenidos en la evaluación de las diferentes propuestas presentadas para comparativa de prestaciones entre precodificadores. En la sección 4.1 se establecen los parámetros iniciales de la propuesta de estudio y utilizados en las simulaciones. Por último, en la sección 4.2 se presentan los resultados del análisis para los distintos escenarios llevados a cabo (i.e., usuarios distribuidos uniformemente, clusterizados en grupos de 10 usuarios y agrupados en un único grupo); así como un análisis adicional para obtener conclusiones avanzadas.

4.1. Propuesta de estudio

En el siguiente capítulo, se propone realizar una batería de simulaciones que se detallarán a continuación, con el objetivo de estudiar las características *multicast* en un entorno CF-mMIMO utilizando diferentes precodificadores en el DL. El análisis de estas simulaciones permitirá comprender el efecto que tiene la agrupación de los usuarios en subgrupos dentro de la eficiencia espectral para la transmisión de datos en el DL y la comparación con diversos precodificadores distribuidos implementados a partir de modificaciones del clásico CB, como se ha establecido en la sección 3.2.

Para llevar a cabo el estudio previamente descrito, se ha trabajado con los códigos desarrollados en MATLAB que se encuentran alojados en el repositorio de GitHub *CFmMIMO-MRSubgroup*¹ [40].

Para las simulaciones realizadas se han considerado los parámetros principales que se establecen en la Tabla 4.1 y que definirán las distintas simulaciones que se han realizado, caracterizando las variables y constantes para todas las simulaciones.

De manera análoga, cabe destacar algunos de los parámetros establecidos para cada escenario que sirvan de referencia para contextualizar los datos extraídos de las simulaciones presentadas en el TFG. Estas constantes principales son la potencia total de transmisión UL por usuario ($p = 100 \text{ mW}$) y la potencia total por usuario de los pilotos, usados en la transmisión DL ($\rho_{tot} = 200 \text{ mW}$). Asimismo, cabe destacar que para la ejecución de las simulaciones se plantea un escenario donde las N antenas de los APs se suponen incorreladas (*i.e.*, los ángulos de desviación angular estándar son nulos); basarse en este hecho es perfectamente lógico en situaciones reales, cuando las antenas dipolos están lo suficientemente separadas entre sí dentro de cada AP (*i.e.*, al menos una distancia de $\lambda/2$ entre cada antena), para que las señales enviadas y recibidas por cada una no interfieran entre sí [41].

A continuación, se presentan de manera detallada todos los casos para los que se han realizado simulaciones, con una breve descripción de las características de cada uno:

- Escenario con usuarios uniformemente distribuidos en el espacio (donde $K_c = 1$ y $C = 100$) para los casos de transmisión *unicast* (*i.e.*, $G = 100$), *multicast* utilizando subgrupos (*i.e.*, $G = 10, 25, 50$ y 75) y *broadcast* (*i.e.*, $G = 1$) utilizando los precodificadores CB, NCB y ECB.
- Escenario con usuarios clusterizados, en el cual se tienen $K = 100$ usuarios *multicast* distribuidos en 10 clústeres espaciales de 10 usuarios cada uno (*i.e.*, $K_c = 10$ y

¹Para más información y revisión/modificación del código, ver el repositorio disponible en: <https://github.com/aesrobl/CFmMIMO-MRSubgroup>

Parámetros	Valores	Descripción
G	[1, 10, 25, 50, 75, 100]	Número de subgrupos en los que se dividen los usuarios cuando se realizan las transmisiones DL <i>unicast</i> y <i>multicast</i> .
n_{setups}	500	Número de <i>setups</i> o simulaciones realizadas para sacar conclusiones según el método de Monte Carlo.
$n_{realizaciones}$	100	Número de realizaciones de canal realizadas por <i>setup</i> o simulación.
N	[4, 8, 16]	Número de antenas por AP para cada simulación.
L	100	Número de APs desplegados en los escenarios CF-mMIMO en estudio.
K_c	[1, 2, 4, 5, 10, 20, 25, 50, 100]	Número de usuarios pertenecientes agrupados en un mismo clúster.
C	[1, 2, 4, 5, 10, 20, 25, 50, 100]	Número de clústeres que hay distribuidos en el entorno.
K	100	Número total de usuarios en todo el escenario.
τ_c	100	Longitud total del bloque de coherencia del canal.
τ_p	$\min(G, 10)$	Longitud de las secuencias de pilotos utilizadas, dependientes del número de subgrupos.

Tabla 4.1: Parámetros utilizados en la simulación de los escenarios.

$C = 10$) para los casos de transmisión *unicast*, *multicast* utilizando subgrupos y *broadcast* utilizando los precodificadores CB, NCB y ECB.

- Escenario con usuarios clusterizados en un único grupo, en el cual se tienen $K = 100$ usuarios *multicast* distribuidos en 1 clúster espacial de 100 usuarios (*i.e.*, $K_c = 100$ y $C = 1$) para los casos de transmisión *unicast*, *multicast* utilizando subgrupos y *broadcast* utilizando los precodificadores CB, NCB y ECB.

Además de realizar estas simulaciones para el caso base, donde se realiza una transmisión por parte de los APs con $N = 8$ antenas; para tener una visión más completa y poder comparar de manera detallada las características de los tres precodificadores, se realizaron las mismas simulaciones para los casos con $N = 4$ y $N = 16$ antenas.

4.2. Discusión y análisis de los resultados

A continuación, se presentan las distintas figuras de probabilidad, a partir de su función de distribución acumulada (*cumulative distribution function*, CDF), que relacionan la SE según los distintos casos que se han establecido en la anterior sección. Para ello, se ha realizado una muestra de distintos casos representativos de los distintos escenarios que se han llevado a cabo para analizar el comportamiento de los distintos tipos de precodificadores en la calidad de la señal que recibe el usuario.

Las gráficas de los distintos casos de estudio se han realizado teniendo en cuenta tanto la SE que obtenía cada usuario individualmente como la eficiencia espectral acumulada (*acummulative spectral efficiency*, ASE) de todos los usuarios en el análisis.

4.2.1. Escenario con usuarios uniformemente distribuidos

El primer caso que se analizará es el que se muestra en la Figura 4.1 donde se observan nueve CDF para cada tipo de precodificador que está siendo objeto de estudio y para tres casos diferentes de modos de operar según la agrupación que se ha realizado a los usuarios.

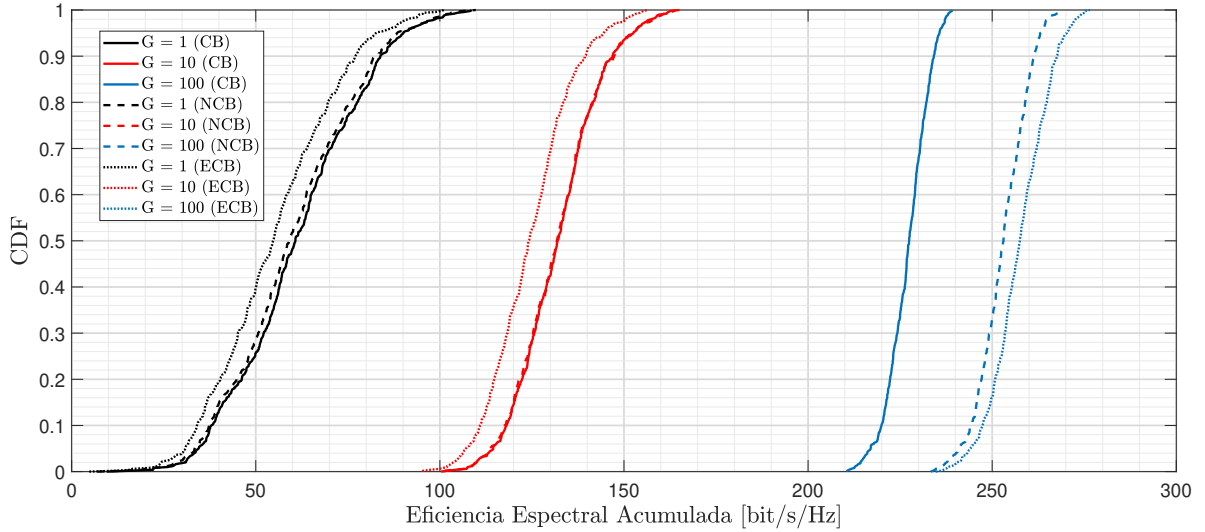


Figura 4.1: CDF de la SE acumulada para $K = 100$ usuarios en escenario uniforme ($K_c = 1$ y $C = 100$) con 8 antenas por AP para CB, NCB y ECB.

En la Figura 4.1 se destacan tres tipos de agrupación que se han llevado a cabo en la simulación, siendo estos:

- En el caso para $G = 1$, se tiene un escenario *multicast* puro, de manera que se

agrupa a todo el conjunto de K usuarios en una única transmisión de datos DL.

- En el caso para $G = 10$, se tiene un escenario *multicast* agrupado, siendo este caso uno de los principales supuestos que se estudian en el presente trabajo con la realización de varios subgrupos para el total de K usuarios, dividiendo los recursos y enviando la información repartida en 10 subgrupos dentro de toda la distribución de UE en estudio.
- En el caso para $G = 100$, se tiene un escenario *unicast*, de manera que los recursos se asignan, y la información se transmite de forma individualizada a cada uno de ellos en su propio trayecto dedicado.

En la Figura 4.1, se encuentra que para el escenario donde todos los usuarios están uniformemente distribuidos por todo el área de cobertura, la mayor eficiencia espectral acumulada, teniendo en cuenta todos los usuarios, se consigue estableciendo en los AP la metodología *unicast*, independientemente del tipo de precodificador que se utilice. A la vista de las gráficas, se puede ver que para el caso *unicast* ninguno de los tres precodificadores disminuye de los 200 bit/s/Hz de ASE para la totalidad de usuarios del escenario, mientras que en el caso *multicast* "puro", solo un número muy reducido, en torno al 6 %, de casos supera los 90 bit/s/Hz .

Otra diferencia que se puede encontrar entre los distintos tipos de agrupaciones está en la pendiente de las distintas gráficas de la CDF para los diferentes casos, teniendo mucha más disparidad entre la ASE de los usuarios para el caso *multicast* "puro" donde la pendiente de las CDF es mayor (*i.e.*, el total de usuarios tiene en los distintos casos ASE desde 40 bit/s/Hz hasta 100 bit/s/Hz), debido a que en este tipo de transmisión al realizar el método de Montecarlo en las simulaciones, verían más las prestaciones entre escenarios en comparación con los otros casos, donde se observan CDF más verticales para los tres tipos de precodificadores.

Estableciendo el foco en el precodificador que tiene mejores prestaciones en este escenario, es decir, el ECB, en la Figura 4.2 se observan las CDF de los usuarios individuales para varios casos de agrupación diferentes. Analizando las gráficas se aprecia, en consonancia con los resultados que se extraían de la ASE, que la mejor SE por usuario se consigue para el modo de transmisión *unicast* donde para el 80 % de los usuarios se asegura obtener una SE de al menos 1,6 bit/s/Hz .

En la Figura 4.2 también se detecta que la transmisión *unicast* es la opción más recomendable en términos generales, pese a que, como se observa, las opciones de agrupar a los usuarios en grupos de $G = 50$ o $G = 75$ ofrecen SEs un poco mejores en aproximadamente el 10 % de las simulaciones aleatorias realizadas.

Realizando un análisis más en profundidad, y para poder comparar las prestaciones

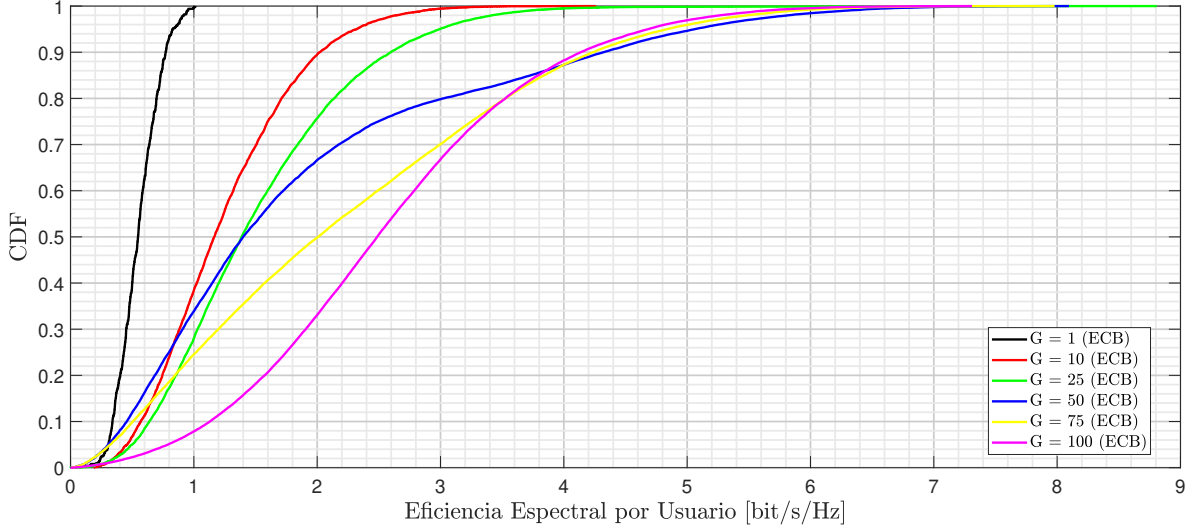


Figura 4.2: CDF de la SE individual para $K = 100$ usuarios en escenario uniforme ($K_c = 1$ y $C = 100$) con 8 antenas por AP para ECB.

de los diferentes precodificadores, en la Figura 4.3 podemos observar las CDF para los tres precodificadores para $N = 8$ antenas (*i.e.*, la configuración de referencia), $N = 4$ y $N = 16$ destacadas con distintos estilos de línea.

A la vista de las distintas gráficas, se puede ver cómo, a medida que se aumenta el número de antenas, aumenta la eficiencia espectral acumulada como cabría esperar debido a la ganancia por diversidad y multiplexación espacial que permite que se reduzcan las interferencias entre los distintos usuarios, así como un aumento en el efecto por *channel hardening* que permite la mejora en el uso de los recursos aumentando así la eficiencia espectral [16][35].

De manera análoga se observa un aumento entre las prestaciones que ofrecen los tres precodificadores, aumentando su distancia respecto a cada uno según se aumenta N , y un hecho notable que se extrae de la Figura 4.3 es el hecho de que con $N = 4$ antenas no se consigue la suficiente multiplexación como para conseguir que el precodificador ECB supere las prestaciones del NCB, y no es a partir de $N = 8$ cuando se consigue que el precodificador ECB supere al NCB, siendo aún más notoria esta mejoría con $N = 16$.

Retomando el análisis comparativo entre las prestaciones de los precodificadores para los distintos casos que se han probado en las simulaciones del presente TFG, se puede apreciar en la Figura 4.4 las CDF de la ASE de los precodificadores CB y ECB para distintos casos de agrupaciones y su comportamiento según el tipo de agrupación, partiendo de un escenario uniforme. Se pone de manifiesto, como se señaló anteriormente en la Figura 4.1, que para un escenario uniforme el mejor caso es aquel donde se realizan grupos de un único usuario (*unicast*), y que el precodificador con mejor desempeño es el

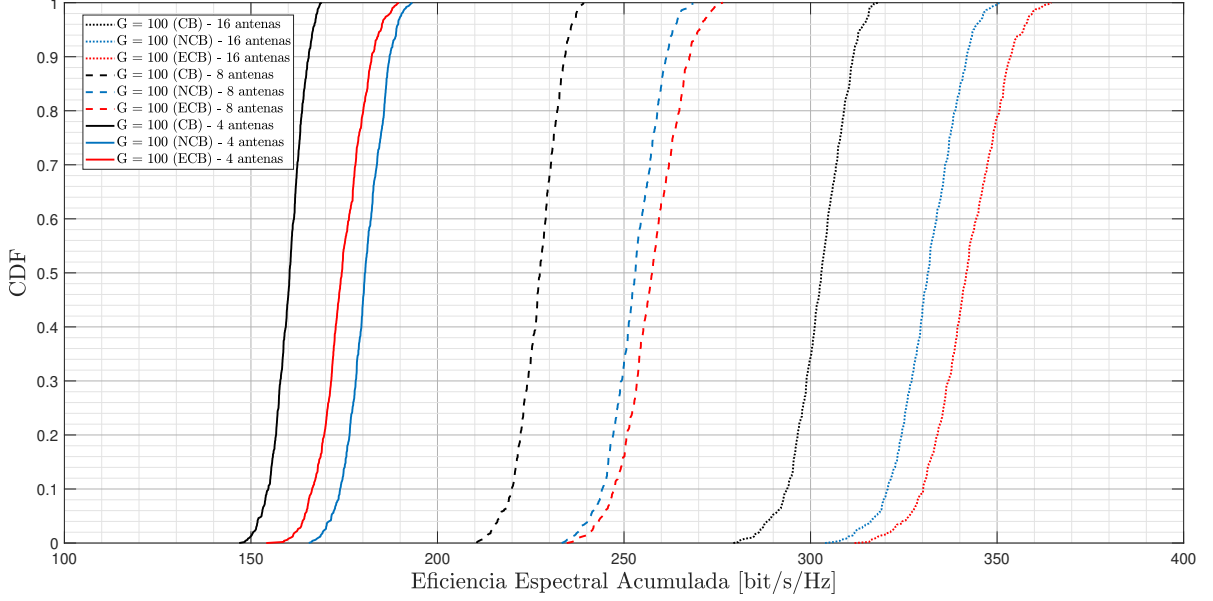


Figura 4.3: CDF de la ASE *unicast* para $K = 100$ usuarios en escenario uniforme ($K_c = 1$ y $C = 100$) para distinto número N de antenas en los AP para CB, NCB y ECB.

ECB. No obstante, se aprecia cómo a medida que vamos realizando agrupaciones a los usuarios con $G = 75$, $G = 50$ o $G = 25$ las eficiencias espectrales acumuladas comienzan a decaer de manera progresiva tomando de referencia el valor de la CDF del precodificador CB para el 90 % de los usuarios con un dato de ASE aproximado de 220 bits/s/Hz , hasta los 38 bits/s/Hz en el escenario más desfavorable donde se agrupan a todos los usuarios en un mismo grupo (*multicast* puro).

De manera análoga podemos ver en la Figura 4.4 cómo la mejora de prestaciones que ofrece el precodificador ECB para el caso modelo con $N = 8$ antenas, se ve mermada a medida que se agrupan a los usuarios, debido a que esta precodificación aumenta las prestaciones del CB gracias a que utiliza la multiplexación de los usuarios para su beneficio y así ofrecer mejor rendimiento para la red en general y cada usuario en particular, empezando a ver cómo las ventajas del precodificador ECB sobre el precodificador CB en *unicast* no son tan notables cuando usamos *multicast* en escenarios con usuarios uniformemente distribuidos.

4.2.2. Escenario con usuarios en $C = 10$ clústeres de $K_c = 10$ usuarios por clúster espacial

El segundo caso que se analizará es el que se muestra en la Figura 4.5 donde se observan las CDF para cada tipo de precodificador que está siendo objeto de estudio para el caso de un escenario en el que los K usuarios se encuentran clusterizados en

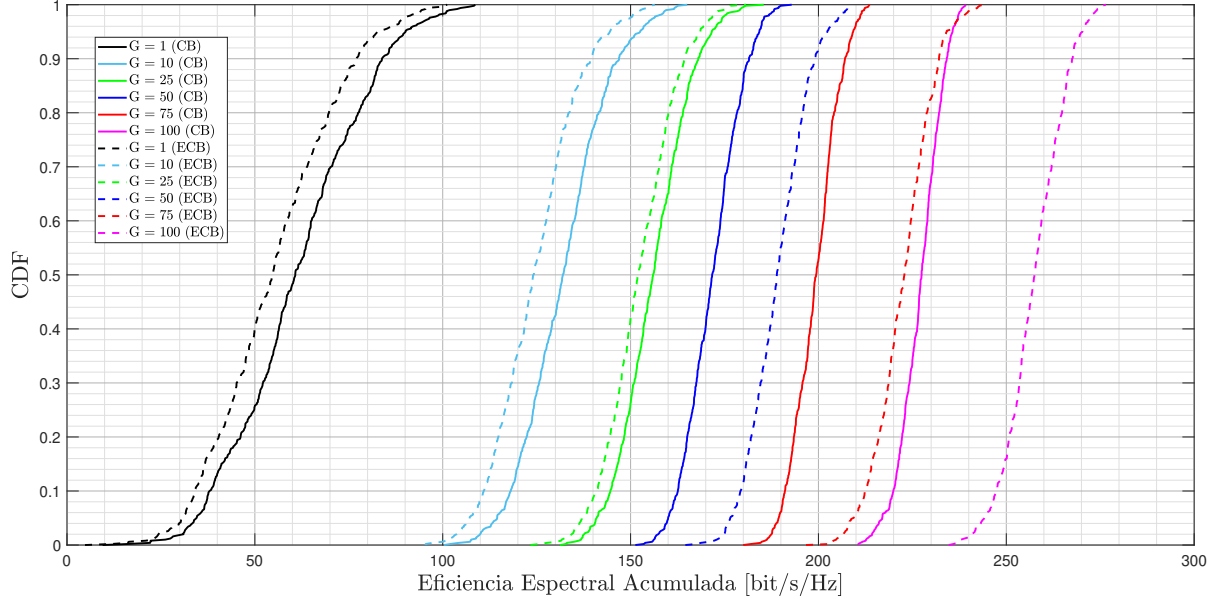


Figura 4.4: CDF de la ASE con diferentes agrupaciones para $K = 100$ usuarios en escenario uniforme ($K_c = 1$ y $C = 100$) con 8 antenas por AP para CB y ECB

grupos de $K_c = 10$ usuarios. Como en el caso anterior, se muestran las funciones para los diferentes casos de agrupaciones en la transmisión DL con $G = 1$, $G = 10$ y $G = 100$.

En esta Figura 4.5, se observa cómo se mantienen bien diferenciados los tres casos de agrupación de usuarios, teniendo tres zonas discriminadas indistintamente del precodificador que se utilice. Esto es más notable cuando se observa el detalle de cada precodificador, donde para el 90 % de simulaciones el resultado en el caso de la transmisión de datos con agrupación $G = 10$, la ASE es mayor de 138 bit/s/Hz ; mientras que para el caso *unicast* puro ($G = 1$) la ASE no sobrepasa los 115 bit/s/Hz , y en el caso *multicast* "puro" ($G = 100$) no se alcanzan para ningún caso con el uso de cualquiera de los precodificadores, los 60 bit/s/Hz .

Además, se puede ver que las prestaciones de los precodificadores en este escenario son diferentes a las planteadas en el escenario con usuarios uniformemente distribuidos. Siendo que en la Figura 4.5 se aprecia la mejora de las prestaciones, en el mejor caso de transmisión *multicast* para $G = 10$, para el precodificador CB, así como el descenso para el caso del ECB donde para un valor fijo de la CDF para el 50 % de los casos, la diferencia entre este precodificador distribuido y los otros dos que son objeto de estudio es de 8 bit/s/Hz .

Como se ha observado, para los precodificadores NCB y CB es donde se obtienen las mejores prestaciones de forma acumulada para este caso *multicast*. Destacando ambos precodificadores, se puede ver en la Figura 4.6 la función de probabilidad con la SE por

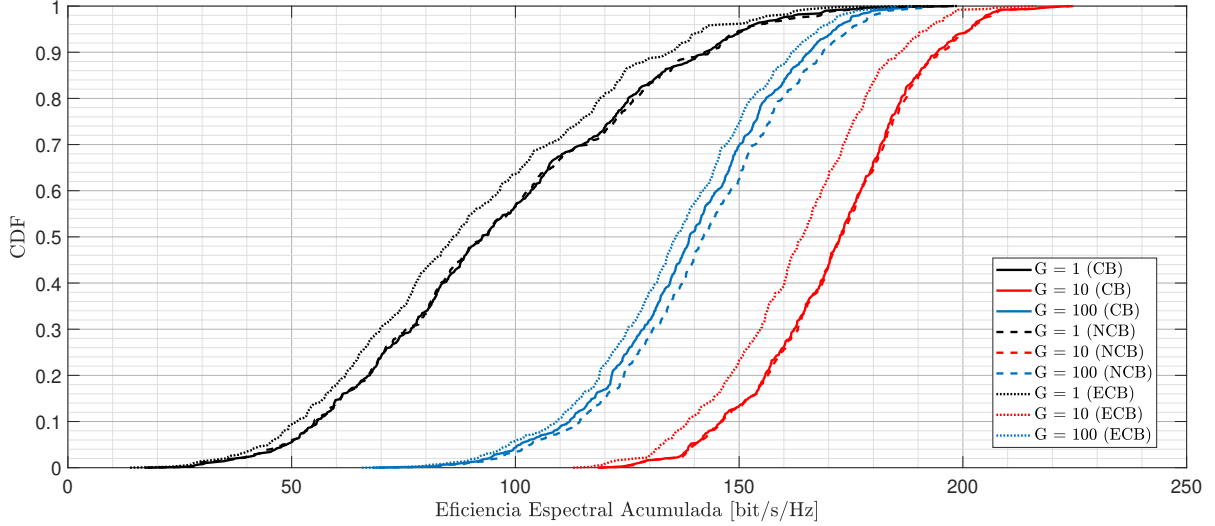


Figura 4.5: CDF de la SE acumulada para $K = 100$ usuarios distribuidos en 10 clústeres espaciales de 10 usuarios cada uno ($K_c = 10$ y $C = 10$) con 8 antenas para CB, NCB y ECB.

usuario que se alcanza con las distintas agrupaciones. La Figura 4.6 confirma lo que se derivaba del análisis de las CDF y ASE de la Figura 4.5, ya que para el 80 % de los usuarios en el caso $G = 10$ la eficiencia espectral por usuario es mayor de $1,2 \text{ bit/s/Hz}$, mientras que para el resto de transmisiones, incluida la *unicast* y la *multicast* "pura", no superan los $0,9 \text{ bit/s/Hz}$.

Asimismo, cabe destacar que en la Figura 4.6 se observa un comportamiento más atípico según ponemos el foco en las distintas simulaciones de escenario más beneficiosas, ya que para el 10 % de las simulaciones convendría utilizar un método de transmisión *multicast* diferente a $G = 10$, llegando a tener las mejores SE con la transmisión *multicast* $G = 50$ y $G = 25$. Señalado este hecho, es importante mencionar el cambio en las prestaciones de los dos precodificadores a medida que se desarrolla la CDF, observando cómo para la mayoría de usuarios (*i.e.*, la parte baja de las CDF), independientemente del tipo de transmisión que se realizase, no verían prácticamente ninguna diferencia entre el uso del NCB y el CB; mientras que, para la minoría ventajosa de usuarios (*i.e.*, la parte alta de las CDF), sí se notaría para la mayoría de casos de transmisión *unicast* puro y *multicast* un beneficio en usar el precodificador NCB, coincidiendo con los estudios que se muestran en [39] para los casos de CF-mMIMO estudiados en la literatura.

En la Figura 4.7 se revela el comportamiento de los tres tipos de precodificadores, para el caso que se ha analizado tiene mejores prestaciones en este escenario clusterizado (*i.e.*, $G = 10$, como muestran las Figuras 4.5 y 4.6), a medida que se cambia el parámetro de las antenas de los AP N . Se observa, como cabría esperar, a mayor número de antenas, mayor es la ASE que puede obtenerse para todos los usuarios como ocurría en la Figura

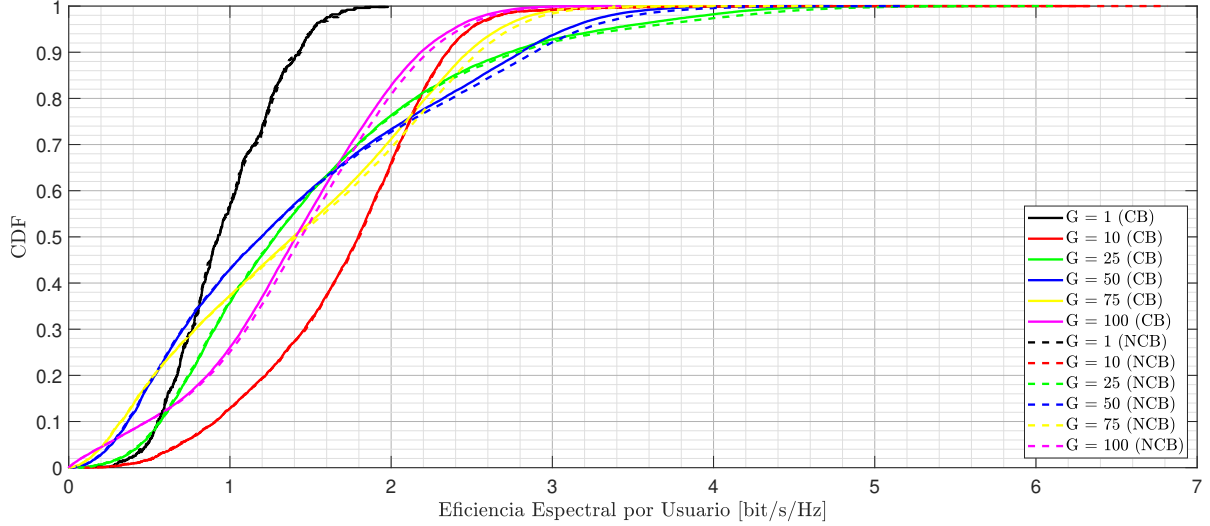


Figura 4.6: CDF de la SE individual para $K = 100$ usuarios distribuidos en 10 clústeres espaciales de 10 usuarios cada uno ($K_c = 10$ y $C = 10$) con 8 antenas por AP para CB y NCB.

4.3; pero además se manifiesta y corrobora que en el caso de $N = 8$ antenas que ya se ha analizado, las diferencias entre las prestaciones tanto del precodificador CB como del NCB son bastante similares en la totalidad de usuarios; así como la variación de resultados a medida que disminuye o aumenta el número de antenas para los precodificadores, siendo el precodificador CB mejor opción en el caso de $N = 4$ antenas y siendo adelantado por el precodificador NCB a partir de $N = 8$ antenas. A su vez, se puede notar que los beneficios de uso del ECB [39], aunque van mejorando a medida que aumenta N , no se llegan a obtener resultados mejores que con el uso de los otros dos precodificadores, ni en el escenario donde $N = 16$.

Retomando a la comparativa del desempeño en este escenario para los distintos tipos de precodificadores y los tipos de transmisión, en la Figura 4.8 se reflejan las CDF para los precodificadores CB y NCB, excluyendo el caso para el precodificador ECB por no superar en los anteriores casos que se han visto a las otras variantes, para distintos casos de G . Destaca de nuevo el hecho de que la SE acumulada mayor en cualquiera de ambos precodificadores se establece para $G = 10$, llegando a superar para el 80 % de realizaciones en aproximadamente 20 bit/s/Hz la ASE frente al segundo caso más beneficioso de transmisión *multicast* agrupando por $G = 25$. También, en la Figura 4.8 se identifica que las prestaciones de ambos precodificadores ofrecen, en general, para varios tipos de transmisión DL, ASE similares para casi todos los casos, por lo que el uso de un precodificador u otro dependería en mayor medida de otros factores.

A la vista de estos resultados, se puede ver cómo para un número moderado de antenas por AP, las prestaciones del precodificador CB cuando se realizan transmisiones *multicast*

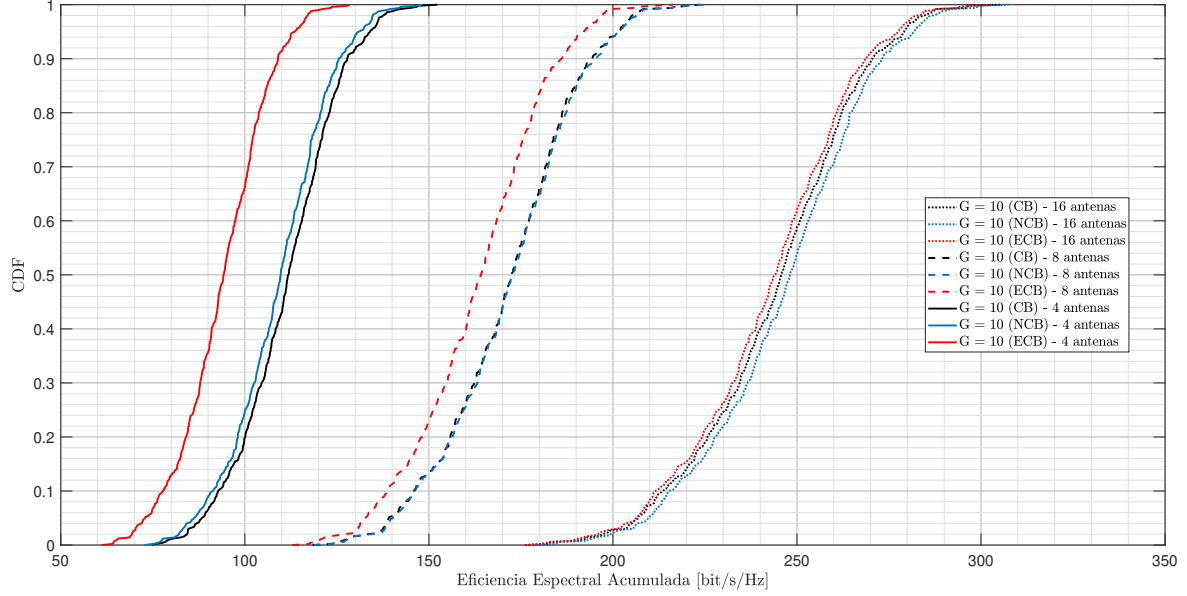


Figura 4.7: CDF de la SE acumulada para $K = 100$ usuarios distribuidos en 10 clústeres espaciales de 10 usuarios cada uno ($K_c = 10$ y $C = 10$) para una transmisión *multicast* $G = 10$, para distinto número N de antenas en los AP para los precodificadores CB, NCB y ECB.

agrupando a los usuarios, no son mejoradas por las prestaciones de los precodificadores NCB y ECB. Asimismo, para un número elevado de antenas (*i.e.*, 16 antenas por AP) con el precodificador NCB, se mejoran las prestaciones también de los precodificadores CB y ECB, lo que podría llevar a pensar en un escenario con un despliegue masivo de APs (*i.e.*, 64 antenas por AP), este último podría llegar a superar las prestaciones del precodificador NCB.

4.2.3. Escenario con usuarios agrupados en un único clúster $C = 1$ de $K_c = 100$ usuarios

El tercer caso que se analizará en este apartado es la transmisión DL para el caso en el que los usuarios del escenario se encuentran todos agrupados en una misma zona. De manera inicial, podemos ver que en la Figura 4.9 se aprecian las CDF de los tres precodificadores y cómo su aspecto es diferente a los mostrados en la Figura 4.1 y la Figura 4.5, ya que en la que se está analizando en este apartado, se destaca la horizontalidad y verticalidad de las funciones para los casos de agrupación *multicast* y *unicast*.

En el caso $G = 100$ podemos ver cómo las prestaciones del sistema DL cuando se transmite *unicast* se ven muy reducidas, llegando con dificultad aproximadamente a los 15 *bit/s/Hz* para los mejores casos. Mientras que, a su vez, destacan las igualadas pres-

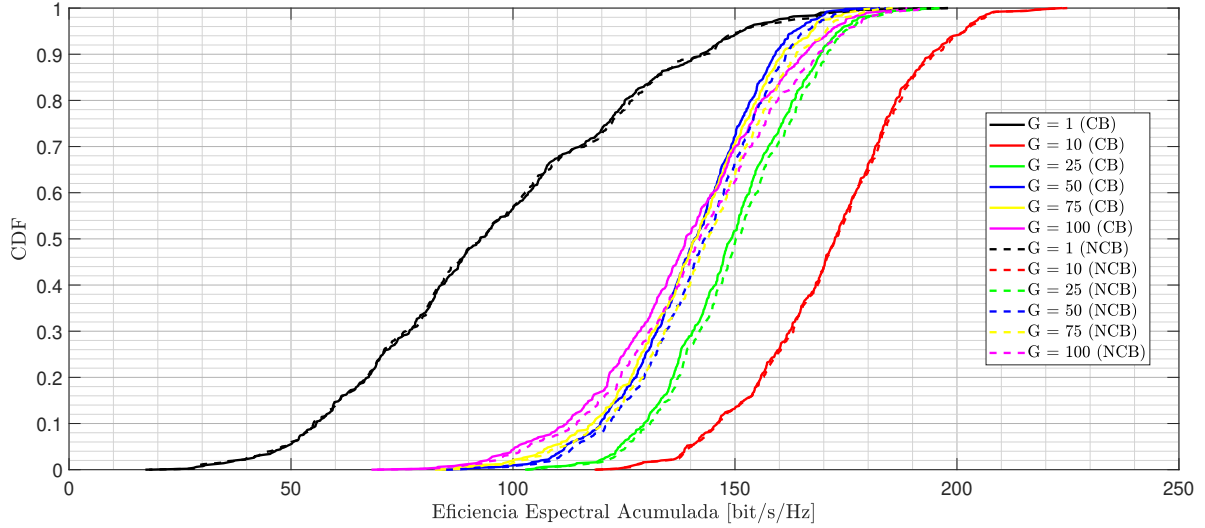


Figura 4.8: CDF de la SE acumulada para $K = 100$ usuarios distribuidos en 10 clústeres espaciales de 10 usuarios cada uno ($K_c = 10$ y $C = 10$) para distintas agrupaciones G de transmisión

taciones de la transmisión para $G = 1$ y $G = 10$, notando además que las gráficas de probabilidad son más horizontales y extendidas por todo el rango de ASE, lo que resulta en mayores variaciones entre las distintas simulaciones y, por ende, en una alta variabilidad entre la ASE que se puede conseguir dependiendo en gran parte de las condiciones iniciales.

Asimismo, cabe destacar el hecho de que, aunque el escenario esté conformado por un único grupo de usuarios en el mismo área, las mejores prestaciones en los tres casos de uso de los precodificadores se logran cuando se realiza una transmisión *multicast* $G = 10$ en vez de realizar una transmisión *multicast* pura. Este hecho confirma que es mejor utilizar todos los recursos de posibles pilotos ortogonales para disminuir el efecto de las pérdidas entre los usuarios que pertenecen al mismo grupo y deben ser atendidos con un mismo precodificador para todos ellos.

Como en el caso anterior, se muestra en la Figura 4.10 las gráficas de la SE para los dos precodificadores con mejores prestaciones para el escenario con un único grupo para todos los casos de transmisión DL contenidos en \mathcal{G} . Como se ha señalado en la Figura 4.9, para ambos tipos de precodificadores las mejores opciones de transmisión son a través del *multicast* "puro" y el *multicast* haciendo subgrupos $G = 10$, observando a su vez la poca diferencia entre la SE alcanzable utilizando tanto el precodificador CB como el NCB, siendo ligeramente superior en estos dos casos el precodificador CB.

Gracias a la Figura 4.10, se puede percibir que el rendimiento de SE obtenible por usuario es ligeramente superior, para un 80 % de usuarios y ambos precodificadores, para el caso de la transmisión *multicast* "pura" frente a la agrupación de los usuarios con $G = 10$

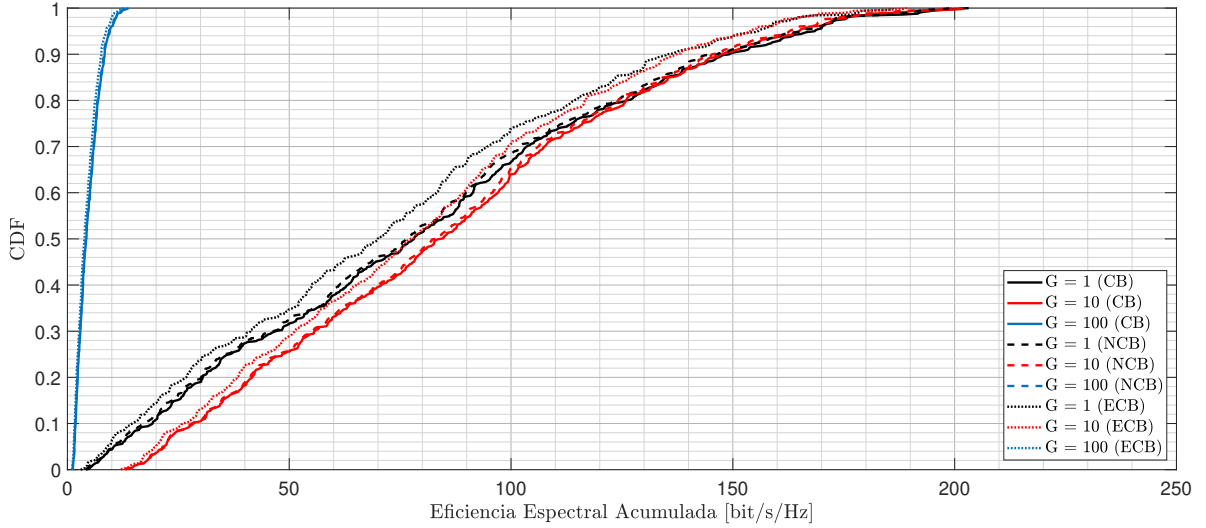


Figura 4.9: CDF de la SE acumulada para $K = 100$ usuarios agrupados en 1 clúster espacial de 100 usuarios ($K_c = 100$ y $C = 1$) con 8 antenas por AP para CB, NCB y ECB

donde apenas se alcanza 1 bit/s/Hz por usuario. Asimismo, se vuelve a demostrar cómo la transmisión *unicast* es el proceso con peores resultados, y cómo las CDF frente a este caso se deforman, creciendo de manera abrupta y vertical, aunque ofreciendo similares prestaciones para todos los usuarios individuales en todos los escenarios.

En la Figura 4.11 se revela el comportamiento de los tres tipos de precodificadores variando el número de antenas de los APs. En la Figura 4.11 se muestran los distintos casos para la transmisión *multicast* con $G = 10$, que es el caso analizado con mejores prestaciones para los usuarios, como se evidencia gracias a las Figuras 4.9 y 4.10. A la vista de las gráficas de la CDF, se observa cómo el caso del precodificador CB es la mejor opción para obtener la máxima ASE para todos los casos de N antenas en estudio, aunque cabe destacar que el precodificador NCB también sería una opción interesante de implementar ya que los resultados no varían mucho respecto al precodificador más sencillo.

Asimismo, en la Figura 4.11 destaca, como en el estudio de los anteriores casos, el comportamiento del precodificador ECB que mejora de manera apreciable a medida que se aumenta el número de antenas. Este hecho hace que, aparte de tener en el caso de las CDF con $N = 16$ que las ASE alcanzables para los precodificadores NCB y CB sean en la práctica iguales, el precodificador ECB se acerque bastante al rendimiento de sus otras variantes.

Por último, en la Figura 4.12 se muestran las funciones CDF y las ASE alcanzables de manera análoga a lo presentado en las anteriores secciones, y resaltando cómo las diferentes formas de transmisión agrupando en subgrupos G , o transmitiendo *multicast*

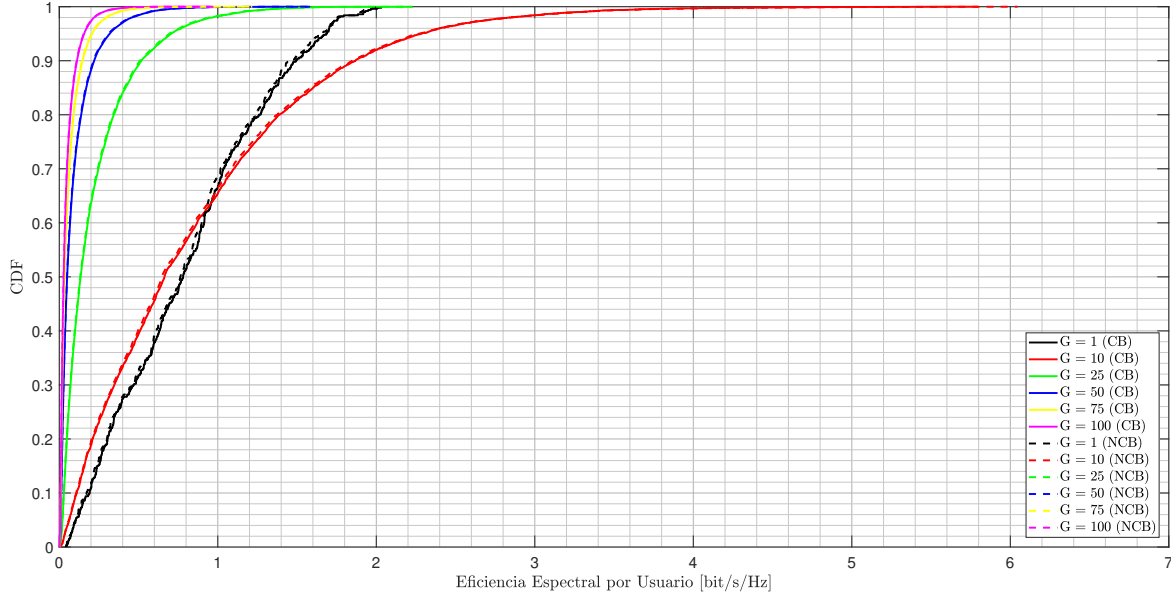


Figura 4.10: CDF de la SE individual por usuario para $K = 100$ usuarios agrupados en 1 clúster espacial de 100 usuarios ($K_c = 100$ y $C = 1$) con 8 antenas por AP para CB, NCB y ECB

”puro” o *unicast* varían en el rendimiento de los precodificadores.

En este caso, se pone de manifiesto lo que se había destacado en el análisis de la Figura 4.9. Se resaltan las prestaciones al realizar la transmisión agrupando a los usuarios en $G = 10$ subgrupos diferentes, seguido de las prestaciones con el caso de la transmisión *multicast* ”pura”; haciendo así que se pueda ver cómo el resto de opciones de transmisión, junto con la *unicast*, no ofrezcan ni un tercio de la ASE acumulada para la mayoría de casos (*i.e.*, el 80 % de escenarios para $G = 25$ se obtendría una disminución de más de 20 *bit/Hz/s* frente a la opción *multicast* ”pura”), a pesar de que las gráficas para los casos $G > 10$ tengan mejores prestaciones en general para todos los casos de usuarios al tener unas CDF más verticales.

4.2.4. Otros escenarios relevantes en el estudio

Habiendo realizado el análisis en los tres tipos de escenarios principales para los que se han discutido las características y prestaciones, en esta sección se presenta un ejemplo de las CDF para distintos casos combinando los casos de las secciones 4.2.1, 4.2.2 y 4.2.3, y aplicando algunas de las características que se han identificado de su estudio.

Un ejemplo relevante de los casos mencionados, para todas las simulaciones que se han realizado, es el que se presenta en la Figura 4.13. En la Figura 4.13 se pueden ver las distribuciones de probabilidad para los tres casos de estudio: escenario uniforme,

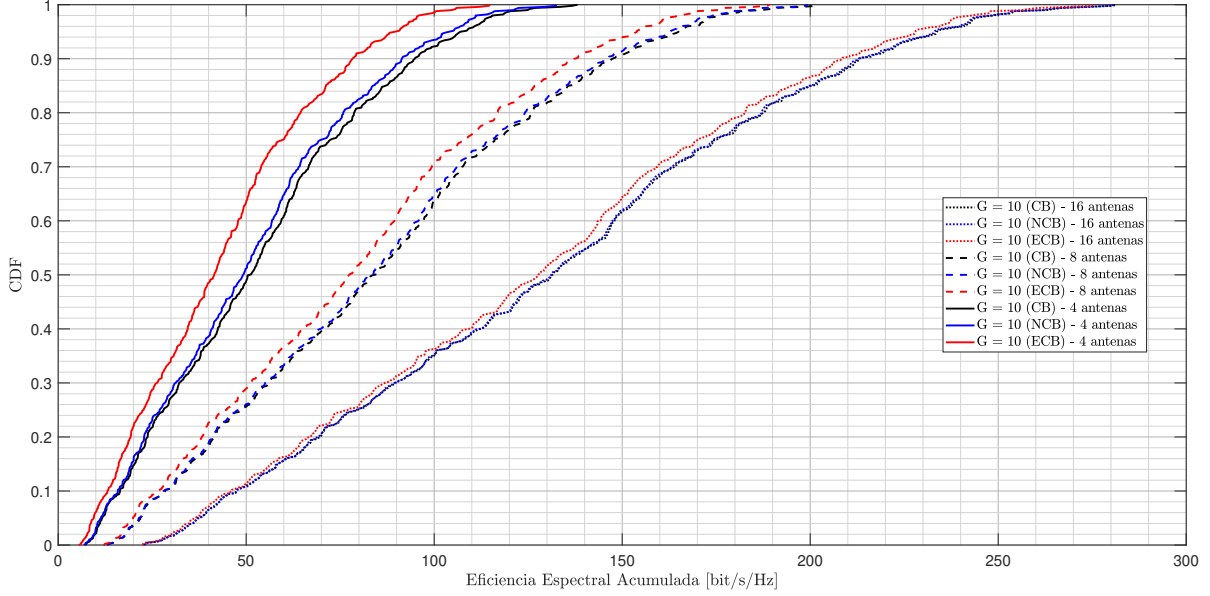


Figura 4.11: CDF de la SE acumulada para $K = 100$ usuarios agrupados en 1 clúster espacial de 100 usuarios ($K_c = 100$ y $C = 1$) para CB, NCB y ECB con diferente número de antenas N por AP

clústerizado ($K_c = 10$ y $C = 10$) y clústerizado unigrupal ($K_c = 100$ y $C = 1$); utilizando los precodificadores NCB y CB, para los casos de transmisión $G = 10$ y $G = 100$.

A la vista de estos resultados, conforme a lo previsto considerando los resultados anteriores, la mayor SE acumulada se obtiene para ambos precodificadores en el escenario donde los usuarios están uniformemente distribuidos y se utiliza la transmisión *unicast* (*i.e.*, cuando $G = 100$). Sin embargo, siguiendo con el análisis del escenario uniforme frente al resto de escenarios y prestaciones de ambos precodificadores, viendo que en el escenario uniforme, la transmisión *unicast* mejora a cualquier tipo de transmisión *multicast* y el precodificador NCB supera a los otros dos precodificadores analizados; para los casos en los que los usuarios están clusterizados espacialmente ($K_c = 10$ y $C = 10$, y $K_c = 100$ y $C = 1$), hacer transmisiones *multicast* agrupando a los usuarios mejora a la transmisión *unicast*, y los precodificadores NCB y CB tienen prestaciones similares.

Para finalizar, se puede observar cómo en las transmisiones *unicast*, se diferencian más los valores que se pueden obtener con el precodificador CB y el precodificador NCB, haciéndose más notoria la mejora de este último frente a su versión original tanto en el escenario uniforme como en el clusterizado ($K_c = 10$ y $C = 10$); enfrentando este hecho con los casos de transmisión en subgrupos donde las ventajas del uso del precodificador NCB se atenúan frente a las capacidades obtenibles con el uso del precodificador CB.

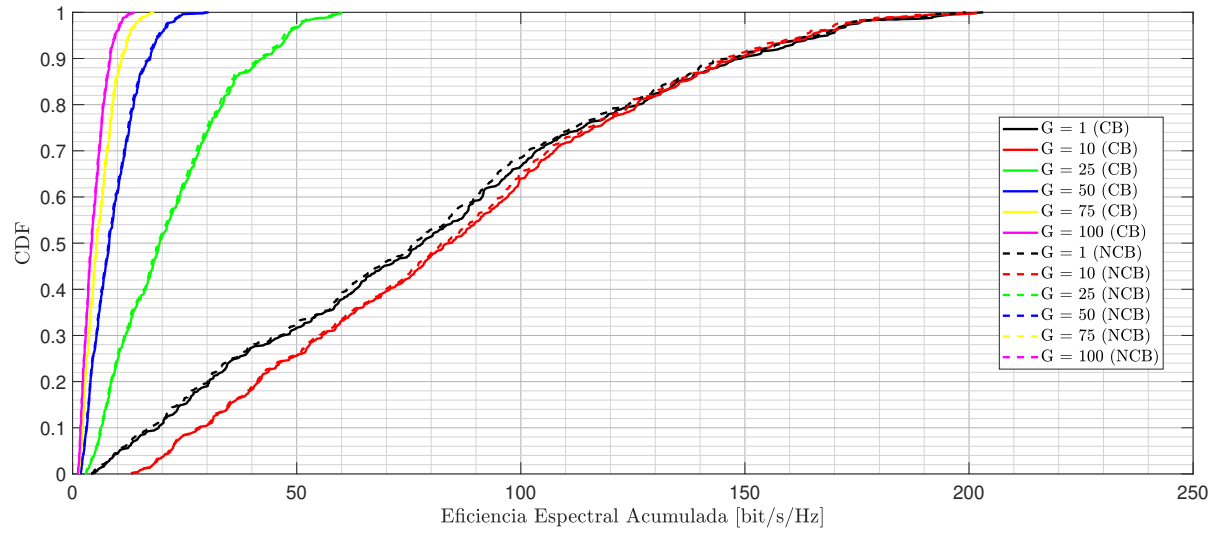


Figura 4.12: CDF de la SE acumulada para $K = 100$ usuarios agrupados en 1 clúster espacial de 100 usuarios ($K_c = 100$ y $C = 1$) para CB y NCB con $N = 8$ antenas por AP y para todos los casos de transmisión G

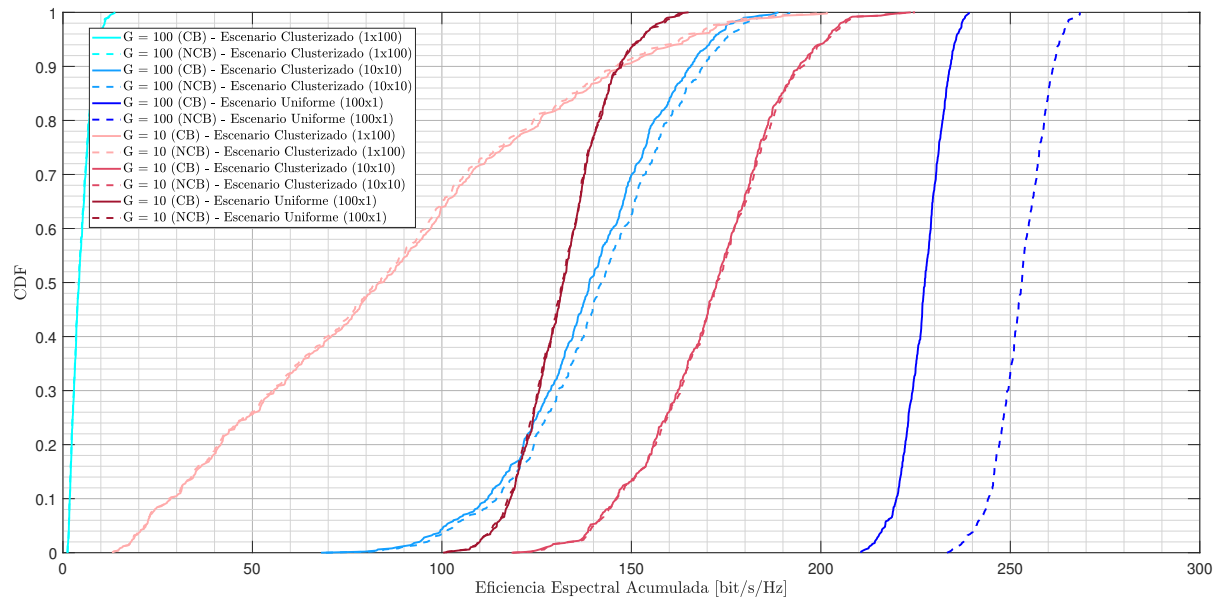


Figura 4.13: CDF de la SE acumulada para distintos escenarios de distribución de usuarios CF-mMIMO para precodificadores CB y NCB para transmisiones *multicast* con agrupación de usuarios $G = 10$ y $G = 100$

5

CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En este quinto capítulo se exponen, en la sección 5.1, las conclusiones obtenidas durante la realización del presente TFG, así como aquellas obtenidas tras el análisis de los resultados extraídos. Por último, en la sección 5.2, se establecen líneas de investigación futuras que se podrían seguir para avanzar en base a lo expuesto en este trabajo.

5.1. Conclusiones

Tras haber realizado una revisión del estado del arte en el capítulo 2, definir los parámetros y el modelo matemático utilizados en el capítulo 3, y presentar y analizar los resultados de las simulaciones realizadas en el capítulo 4; en el presente capítulo se muestran las conclusiones obtenidas, así como líneas futuras de investigación sobre la temática del TFG.

En este TFG se han cumplido todos los objetivos, general y específicos, sobre el análisis del comportamiento y las prestaciones de los tres precodificadores distribuidos para tecnologías CF-mMIMO, en diversos entornos con usuarios repartidos de manera uniforme o clusterizada, bajo un modelo de transmisión DL *multicast*.

En primer lugar, los resultados obtenidos demuestran, como se ha mencionado anteriormente y acorde a lo establecido en la literatura, que en escenarios donde los usuarios se encuentran uniformemente repartidos, la mejor opción para obtener la mayor tasa de datos DL es a través de la transmisión *unicast*. Partiendo sobre esta premisa, se observan mejoras de aproximadamente un 11,5 % para esta transmisión entre el uso del precodificador NCB y el precodificador CB, siendo esta mejora ligeramente superior si se compara con el precodificador ECB. Además, esta mejora se mantiene y coincide también en los supuestos para los otros casos *multicast* en diferentes agrupaciones, objeto central de este trabajo.

Con estos datos, es intuitivo pensar que cuanto mayor sea la complejidad del precodificador, mejores serán sus resultados en términos de SE y ASE. Siendo el orden de mejora de los precodificadores desde el ECB, NCB y CB, respectivamente, y cuyas diferencias aumentan a medida que se aumenta el número de antenas, manteniéndose en este orden independientemente del tipo de transmisión y la agrupación que se realice de los usuarios para transmitir los datos.

En segundo lugar, partiendo de esta última deducción y objetivo principal de este trabajo, se ha observado el comportamiento de los precodificadores a través de un análisis para los supuestos en los que los usuarios se encuentran de alguna manera clusterizados espacialmente, ya sea en conjuntos de $K_c = 10$ usuarios o en un único conjunto de $K_c = 100$ usuarios. Siendo estos escenarios clave en el desarrollo de las conclusiones, debido a que presentan un marco un poco más cercano a la realidad donde no todos los usuarios se encuentran repartidos uniformemente.

Para ambos escenarios, se revela que las mejores tasas de datos se obtienen a través de la transmisión *multicast* con agrupación de los usuarios en $G = 10$ grupos, estableciéndose el precodificador ECB, que en el escenario uniforme era la mejor opción para maximizar la SE y ASE, con una diferencia para el caso de usuarios clusterizados en grupos de $K_c = 10$, de aproximadamente un 5 % de deterioro frente a los resultados obtenidos con

los precodificadores CB y NCB. De esta forma, se puede concluir que las prestaciones del precodificador distribuido más simple maximizan de manera notable los valores de SE y ASE obtenibles en casos para los que haya usuarios clusterizados en transmisiones *multicast*.

Asimismo, al realizar el estudio sobre la mejora de los precodificadores a medida que se aumenta el número de antenas, se destaca el comportamiento del precodificador ECB que, aunque mejora su valor de SE/ASE alcanzable con un alto número de antenas (*i.e.*, $N = 16$) y se va acercando en los escenarios clusterizados a las prestaciones de los precodificadores CB y NCB, no consigue superarlos con tanto margen como ocurría en los escenarios uniformes con transmisión *unicast*. Este hecho hace pensar que se podría aumentar el número de antenas en los escenarios, para ver si en algún momento podría llegar a alcanzar el precodificador ECB, aunque por otro lado, al aumentar el número de antenas más allá de los valores que se han analizado en el TFG supondría tener que desplegar APs con bastantes antenas, perdiendo en parte la esencia por la que surge la tecnología CF-mMIMO.

En tercer y último lugar, cómo se adelanta en los párrafos anteriores, otra cuestión relevante que se demuestra con las simulaciones y análisis llevados a cabo es el hecho de que, cuando nos encontramos realizando un estudio de transmisión *multicast* en usuarios clusterizados espacialmente, los máximos valores de SE y ASE se obtienen, independientemente del precodificador utilizado, realizando una transmisión *multicast* agrupando por grupos según cómo estén situados los usuarios en clústeres.

Además, se destaca la opción de transmisión *unicast* por no estar entre las primeras opciones de transmisión para maximizar la SE y ASE obtenida, siendo superada en varios de los casos expuestos por otros tipos de transmisión *multicast* con diferentes números de subgrupos, G . Parte de este posible resultado depende del hecho de que al realizar la precodificación y procesamiento de los datos, cuando se realiza una transmisión *unicast* acaba teniendo peores valores de SE y ASE por la contaminación de señales entre los distintos usuarios; mientras que cuando se realiza *multicast* realizando agrupaciones, como todos los usuarios comparten la misma información dentro de un subgrupo, y se pueden utilizar los pilotos de manera más eficiente, la contaminación por culpa de ellos disminuye moderadamente.

Con estas conclusiones, se puede afirmar en términos generales que la opción de transmisión *multicast*, agrupando a los usuarios, para escenarios donde los usuarios están clusterizados, es la elección adecuada si se quiere aumentar la SE y ASE obtenidas; junto con el uso del precodificador CB, que obtiene los mejores valores y cuya complejidad computacional es la menor entre todas las opciones estudiadas para precodificadores distribuidos, quedándose el precodificador NCB como otra buena opción.

5.2. Trabajo futuro

Con base en los resultados obtenidos y conclusiones presentadas, se pueden establecer algunas líneas de investigación futuras que complementasen o ampliasen los conocimientos sobre este tema. Asimismo, la profundización sobre algunas de las siguientes líneas futuras podría establecer nuevas perspectivas o mejoras respecto a los resultados obtenidos.

En vista de este hecho, algunas de las líneas futuras que se podrían seguir en relación a este TFG son:

- Estudiar el comportamiento de los tres tipos de precodificadores distribuidos para casos de usuarios repartidos tanto uniformemente, como de manera clusterizada (*i.e.*, estudio en entornos híbridos), enfatizando el comportamiento del precodificador NCB debido a sus constantes resultados aceptables para los escenarios y resultados expuestos.
- Ampliar el estudio de los escenarios descritos para otro tipo de precodificadores no analizados, como el precodificador *zero-forcing*, que pudieran tener resultados interesantes a tener en consideración.
- Explorar la simulación de entornos similares con distintos tipos de modelos de canal más complejos, que acercasen los resultados para otro tipo de contextos en la realidad, como modelos más semejantes a urbes o zonas rurales.
- Investigar la posibilidad de poner en práctica técnicas y herramientas de aprendizaje máquina (*machine learning*, ML) para escoger dinámicamente la mejor agrupación de usuarios en la transmisión *multicast* dependiendo del escenario.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Amy Nordrum. «Everything You Need to Know About 5G: Millimeter waves, massive MIMO, full duplex, beamforming, and small cells are just a few of the technologies that could enable ultrafast 5G networks». En: *IEEE Spectrum* (2017). Recuperado el 18 de febrero de 2024 de <https://spectrum.ieee.org/everything-you-need-to-know-about-5g>.
- [2] *Ericsson Mobility Report – November 2023*. Recuperado el 20 de enero de 2024 de <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/mobility-report/reports/november-2023>. Ericsson. Nov. de 2023.
- [3] Anton A Huurdeman. *The worldwide history of telecommunications*. John Wiley & Sons, 2003.
- [4] Anju Uttam Gawas. «An overview on evolution of mobile wireless communication networks: 1G-6G». En: *International journal on recent and innovation trends in computing and communication* 3.5 (2015), págs. 3130-3133.
- [5] Petar Popovski et al. «5G wireless network slicing for eMBB, URLLC, and mMTC: A communication-theoretic view». En: *Ieee Access* 6 (2018), págs. 55765-55779.
- [6] Rath Vannithamby y Anthony Soong. *5G Verticals: Customizing Applications, Technologies and Deployment Techniques*. John Wiley & Sons, 2020.
- [7] 3GPP. «System architecture for the 5G system». En: *3GPP TS 23.501 V15. 3.0* (2018).
- [8] Yi Qian. «Beyond 5G wireless communication technologies». En: *IEEE wireless communications* 29.1 (2022), págs. 2-3.
- [9] Stefan Parkvall et al. «NR: The new 5G radio access technology». En: *IEEE Communications Standards Magazine* 1.4 (2017), págs. 24-30.
- [10] Thomas L Marzetta. «Massive MIMO: an introduction». En: *Bell Labs Technical Journal* 20.20 (2015), págs. 11-22.
- [11] Emil Björnson, Jakob Hoydis, Luca Sanguinetti et al. «Massive MIMO networks: Spectral, energy, and hardware efficiency». En: *Foundations and Trends® in Signal Processing* 11.3-4 (2017), págs. 154-655.
- [12] Thomas L Marzetta, Erik G Larsson y Hong Yang. *Fundamentals of massive MIMO*. Cambridge University Press, 2016.
- [13] Michail Matthaiou et al. «Massive MIMO with a generalized channel model: Fundamental aspects». En: *2019 IEEE 20th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC)*. IEEE. 2019, págs. 1-5.

- [14] Robin Chataut y Robert Akl. «Massive MIMO systems for 5G and beyond networks—overview, recent trends, challenges, and future research direction». En: *Sensors* 20.10 (2020), pág. 2753.
- [15] Hien Quoc Ngo et al. «Cell-free massive MIMO: Uniformly great service for everyone». En: *2015 IEEE 16th international workshop on signal processing advances in wireless communications (SPAWC)*. IEEE. 2015, págs. 201-205.
- [16] Özlem Tugfe Demir, Emil Björnson, Luca Sanguinetti et al. «Foundations of user-centric cell-free massive MIMO». En: *Foundations and Trends® in Signal Processing* 14.3-4 (2021), págs. 162-472.
- [17] Hien Quoc Ngo et al. «Cell-free massive MIMO versus small cells». En: *IEEE Transactions on Wireless Communications* 16.3 (2017), págs. 1834-1850.
- [18] Emil Björnson y Luca Sanguinetti. «Making cell-free massive MIMO competitive with MMSE processing and centralized implementation». En: *IEEE Transactions on Wireless Communications* 19.1 (2019), págs. 77-90.
- [19] Emil Björnson. «Dynamic Cooperation Clusters». En: *Wireless Future* (nov. de 2019). Recuperado el 17 de marzo de 2024 de <https://ma-mimo.ellintech.se/2019/11/28/dynamic-cooperation-clusters/>.
- [20] Claude Elwood Shannon. «Communication in the presence of noise». En: *Proceedings of the IRE* 37.1 (1949), págs. 10-21.
- [21] Giovanni Interdonato, Pal Frenger y Erik G Larsson. «Scalability aspects of cell-free massive MIMO». En: *ICC 2019-2019 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. IEEE. 2019, págs. 1-6.
- [22] Martin Bakhuizen y Uwe Horn. «Mobile broadcast/multicast in mobile networks». En: *Ericsson Review* 1 (2005), pág. 2005.
- [23] Orhan Ergun. «Unicast Multicast Broadcast Anycast and Incast Traffic Types». En: *OE Blogs* (2022). Recuperado el 07 de mayo de 2024 de <https://orhanergun.net/unicast-multicast-broadcast-anycast-and-incast-traffic-types>.
- [24] K. Dongwook. «Broadcast, multicast technologies». En: *3GPP MCC* (2023). Recuperado el 08 de mayo de 2024 de <https://www.3gpp.org/technologies/broadcast-multicast1>.
- [25] Alejandro de la Fuente, Giovanni Interdonato y Giuseppe Araniti. «User subgrouping and power control for multicast massive MIMO over spatially correlated channels». En: *IEEE Transactions on Broadcasting* 68.4 (2022), págs. 834-847.
- [26] Jordi Calabuig, Jose F Monserrat y David Gomez-Barquero. «5th generation mobile networks: A new opportunity for the convergence of mobile broadband and broadcast services». En: *IEEE Communications Magazine* 53.2 (2015), págs. 198-205.
- [27] Ke Xiao, Liang Gong y Michel Kadoch. «Opportunistic multicast NOMA with security concerns in a 5G massive MIMO system». En: *IEEE Communications Magazine* 56.3 (2018), págs. 91-95.
- [28] Alejandro De La Fuente et al. «Subband CQI feedback-based multicast resource allocation in MIMO-OFDMA networks». En: *IEEE Transactions on Broadcasting* 64.4 (2018), págs. 846-864.

- [29] Xin Meng, Xiang-Gen Xia y Xiqi Gao. «Omnidirectional space-time block coding for common information broadcasting in massive MIMO systems». En: *IEEE Transactions on Wireless Communications* 17.3 (2016), págs. 1407-1417.
- [30] Alejandro De La Fuente et al. «Subgroup-Centric Multicast Cell-Free Massive MIMO». En: *IEEE Open Journal of the Communications Society* (2024).
- [31] Emil Björnson, Luca Sanguinetti y Merouane Debbah. «Massive MIMO with imperfect channel covariance information». En: *2016 50th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*. IEEE. 2016, págs. 974-978.
- [32] Felip Riera-Palou et al. «Clustered cell-free massive MIMO». En: *2018 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*. IEEE. 2018, págs. 1-6.
- [33] Alberto Álvarez Polegre et al. «New insights on channel hardening in cell-free massive MIMO networks». En: *IEEE Transactions on Broadcasting* (2020).
- [34] Liutong Du et al. «Cell-free massive MIMO: Joint maximum-ratio and zero-forcing precoder with power control». En: *IEEE Transactions on Communications* 69.6 (2021), págs. 3741-3756.
- [35] Zheng Chen y Emil Björnson. «Channel hardening and favorable propagation in cell-free massive MIMO with stochastic geometry». En: *IEEE Transactions on Communications* 66.11 (2018), págs. 5205-5219.
- [36] Hien Quoc Ngo et al. «On the total energy efficiency of cell-free massive MIMO». En: *IEEE Transactions on Green Communications and Networking* 2.1 (2017), págs. 25-39.
- [37] Giovanni Interdonato y Stefano Buzzi. «Conjugate beamforming with fractional-exponent normalization and scalable power control in cell-free massive MIMO». En: *2021 IEEE 22nd International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC)*. IEEE. 2021, págs. 396-400.
- [38] Giovanni Interdonato et al. «On the performance of cell-free massive MIMO with short-term power constraints». En: *2016 IEEE 21st International Workshop on Computer Aided Modelling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD)*. IEEE. 2016, págs. 225-230.
- [39] Giovanni Interdonato, Hien Quoc Ngo y Erik G Larsson. «Enhanced normalized conjugate beamforming for cell-free massive MIMO». En: *IEEE Transactions on Communications* 69.5 (2021), págs. 2863-2877.
- [40] Adrián Espinosa Robles. *CFmMIMO-MRSubgroup*. <https://github.com/aesrobl/CFmMIMO-MRSubgroup>. 2025.
- [41] David Tse y Pramod Viswanath. *Fundamentals of wireless communication*. Cambridge university press, 2005.