



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

– **TELECOM** ESCUELA
TÉCNICA **VLC** SUPERIOR
DE INGENIERÍA DE
TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de
Telecomunicación

Modelado y análisis de prestaciones de canales MIMO
masivos, Terabit-MIMO

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería de Telecomunicación

AUTOR/A: Navarrete Núñez, Pablo

Tutor/a: Cardona Marcet, Narciso

Cotutor/a externo: Montaner Cardoso, César

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024

Resumen

Este trabajo aborda la problemática que genera el uso de un número masivo de antenas en sistemas de comunicaciones inalámbricas de nueva generación, 6G, que se utilizan para alcanzar velocidades de transmisión cercanas al Terabit por segundo. El número de elementos de las antenas y su tamaño hacen que las aproximaciones de campo lejano, coherencia espacial y reciprocidad del canal radio, entre otras, no se cumplan en todos los escenarios de uso de esta tecnología. Por otra parte, un número masivo de antenas en este tipo de sistemas MIMO genera matrices de canal de tamaños difícilmente manejables para la estimación en tiempo real del canal MIMO. El TFM utiliza herramientas de simulación 3D de alta precisión, mediante las cuales se generan las matrices de canal, se analizan y transforman para facilitar su manipulación y almacenaje, y a partir de ellas se estudian las características del canal T-MIMO (Terabit MIMO) más representativas, como la coherencia espacial. El resultado del TFM contribuirá de manera significativa al desarrollo de las tecnologías de comunicaciones 6G.

Resum

Aquest treball aborda la problemàtica que genera l'ús d'un nombre massiu d'antenes en sistemes de comunicacions sense fil de nova generació, 6G, que s'utilitzen per aconseguir velocitats de transmissió pròximes al Terabit per segon. El nombre d'elements de les antenes i la seua grandària fan que les aproximacions de camp llunyà, coherència espacial i reciprocitat del canal ràdio, entre altres, no es compleixen en tots els escenaris d'ús d'aquesta tecnologia. D'altra banda, un nombre massiu d'antenes en aquest tipus de sistemes MIMO genera matrius de canal de grandàries difícilment manejables per a l'estimació en temps real del canal MIMO. El TFM utilitza eines de simulació 3D d'alta precisió, mitjançant les quals es generen les matrius de canal, s'analitzen i es transformen per facilitar la seua manipulació i emmagatzematge, i a partir d'elles s'estudien les característiques del canal T-MIMO (Terabit MIMO) més representatives, com la coherència espacial. El resultat del TFM contribuirà de manera significativa al desenvolupament de les tecnologies de comunicacions 6G.

Abstract

This paper addresses the problem generated by the use of a massive number of antennas in new generation wireless communications systems, 6G, which are used to achieve transmission rates close to Terabit per second. The number of antenna elements and their size mean that far-field approximations, spatial coherence and radio channel reciprocity, among others, are not met in all scenarios of use of this technology. On the other hand, a massive number of antennas in this type of MIMO systems generates channel matrices of unmanageable sizes for real-time estimation of the MIMO channel. TFM uses high-precision 3D simulation tools, by means of which the channel matrices are generated, analysed and transformed for easy manipulation and storage, and from them the most representative T-MIMO (Terabit MIMO) channel characteristics, such as spatial coherence, are studied. The result of the TFM will contribute significantly to the development of 6G communication technologies.

RESUMEN EJECUTIVO

La memoria del TFM del MUIT debe desarrollar en el texto los siguientes conceptos, debidamente justificados y discutidos, centrados en el ámbito de la IT

CONCEPT (ABET)	CONCEPTO (traducción)	¿Cumple? (S/N)	¿Dónde? (páginas)
1. IDENTIFY:	1. IDENTIFICAR:	S	3
1.1. Problem statement and opportunity	1.1. Planteamiento del problema y oportunidad	S	3-7
1.2. Constraints (standards, codes, needs, requirements & specifications)	1.2. Toma en consideración de los condicionantes (normas técnicas y regulación, necesidades, requisitos y especificaciones)	S	9-15
1.3. Setting of goals	1.3. Establecimiento de objetivos	S	1-2
2. FORMULATE:	2. FORMULAR:	S	29
2.1. Creative solution generation (analysis)	2.1. Generación de soluciones creativas (análisis)	S	29-39
2.2. Evaluation of multiple solutions and decision-making (synthesis)	2.2. Evaluación de múltiples soluciones y toma de decisiones (síntesis)	S	34-39
3. SOLVE:	3. RESOLVER:	S	34
3.1. Fulfilment of goals	3.1. Evaluación del cumplimiento de objetivos	S	34-42
3.2. Overall impact and significance (contributions and practical recommendations)	3.2. Evaluación del impacto global y alcance (contribuciones y recomendaciones prácticas)	S	41-42

Índice general

1. Objetivos	1
2. Introducción	3
3. Regulación e impacto socio-económico	9
3.1. Paradigma internacional	9
3.2. Legislación nacional	11
3.3. Estándares técnicos	12
3.4. Impacto económico	13
3.5. Impacto medioambiental	14
4. Marco teórico	17
4.1. Sistemas MIMO	17
4.1.1. Diversidad de antenas	19
4.1.2. Multiplexación espacial	20
4.1.3. Formación de haces (Beamforming)	20
4.2. MIMO Masivo	21
4.3. Caracterización de canal	22
4.4. Consistencia espacial	23
4.5. Trazado de rayos	24
5. Herramienta de trazado de rayos	27
6. Desarrollo y resultados	29
6.1. Entorno de trabajo	29
6.2. Procesamiento de datos	29
6.2.1. Lectura y almacenamiento de datos	29
6.2.2. Filtrado en potencia	30
6.2.3. Cancelación de rayos duplicados	31
6.2.4. Transformación de la matriz de canal	32
6.2.5. Agrupamiento de rayos	33
6.2.6. Análisis de la consistencia espacial	34
7. Conclusiones y líneas futuras	41
Bibliografía	43

Índice de figuras

2.1.	Distribución de los accesos a redes móviles de internet a nivel mundial en 2023, por generación [1].	3
2.2.	Estadísticas globales sobre el número de usuarios y dispositivos conectados a internet [2].	4
2.3.	Comparación entre 4G, 5G y 6G [3].	5
2.4.	Comparativa del uso de MIMO masivo y un sistema tradicional.	5
3.1.	Espectro radioeléctrico [12].	11
3.2.	Fases de lanzamiento del estándar 6G. Cronología 3GPP [15]	12
3.3.	Crecimiento del mercado global de IoT [16]	13
4.1.	Sistema MIMO punto a punto [19].	17
4.2.	Sistema MIMO multiusuario [3].	18
4.3.	Comparación entre distintas configuraciones de sistemas [21].	19
4.4.	Concepto de evolución del modelo espacial de canal 2D a 3D [24].	21
4.5.	Principales efectos físicos de los rayos [26].	25
5.1.	Extracto del fichero de datos generado por el simulador.	28
6.1.	Cancelación de rayos duplicados.	31
6.2.	Estructura de la matriz de canal.	32
6.3.	Estructura de un elemento (submatriz) de la matriz canal.	33
6.4.	Agrupamiento de rayos por ancho de haz.	34
6.5.	Principales contribuciones del sistema.	34
6.6.	Escenario simulado.	35
6.7.	Escenario simulado, vista desde el transmisor.	36
6.8.	Visualización de los rayos simulados.	36
6.9.	Panel MIMO 4x4.	37
6.10.	Panel MIMO 8x8.	38
6.11.	Panel MIMO 8x8.	39

Capítulo 1

Objetivos

El objetivo principal de este trabajo consiste en contribuir a la caracterización de canales MIMO masivos en entornos de interior, realizando un análisis de la consistencia espacial a lo largo de distintos paneles de antenas receptoras, mediante simulaciones con herramienta de lanzamiento de rayos. Además, se desarrollan una serie de algoritmos de agrupamiento para reducir la sobrecarga de estimación de canal en este tipo de sistemas con un número elevado de antenas. Se analizarán y se compararán diferentes sistemas MIMO, en función de distintos parámetros, tales como la resolución angular o el número de antenas.

Para las simulaciones del canal, se ha empleado una herramienta desarrollada por el instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia (iTEAM) que utiliza el motor de videojuegos Unreal Engine. Esta herramienta utiliza la tecnología de trazado de rayos (*raytracing*) para simular cómo los rayos emitidos por el transmisor se propagan e interactúan con el entorno en un escenario tridimensional, reproduciendo sus efectos en superficies virtuales.

Los resultados obtenidos serán valiosos para futuros diseños de sistemas de comunicaciones y para su comparación con mediciones reales en los entornos simulados. Además, se pretende demostrar la eficacia y versatilidad de la herramienta de trazado de rayos (RT).

La planificación llevada a cabo en este proyecto queda resumida en una serie de capítulos que se desarrollarán a lo largo de este TFM, al margen de este primer bloque de objetivos:

- **Capítulo 2:** Se introduce y se analiza el contexto y motivación que ha llevado a cabo la realización del presente trabajo.
- **Capítulo 3:** Se presenta la situación actual y marco regulador en el que se sitúa el sector de las telecomunicaciones, y más en concreto, los sistemas actuales y futuros de comunicaciones móviles.
- **Capítulo 4:** Se exponen los fundamentos teóricos sobre la caracterización del canal radio en sistemas MIMO y sus parámetros de interés.
- **Capítulo 5:** Se detallan las prestaciones de la herramienta de simulación de trazado de rayos.
- **Capítulo 6:** Se presentan todas las etapas y algoritmos de postprocesamiento, así como los resultados obtenidos.

- **Capítulo 7:** Se analizan las principales conclusiones y líneas futuras de trabajo en base a los resultados obtenidos.

Capítulo 2

Introducción

El sector de las telecomunicaciones está experimentando cambios profundos, impulsados por la digitalización, la convergencia, la regulación y, sobre todo, por el constante crecimiento de la demanda de los clientes.

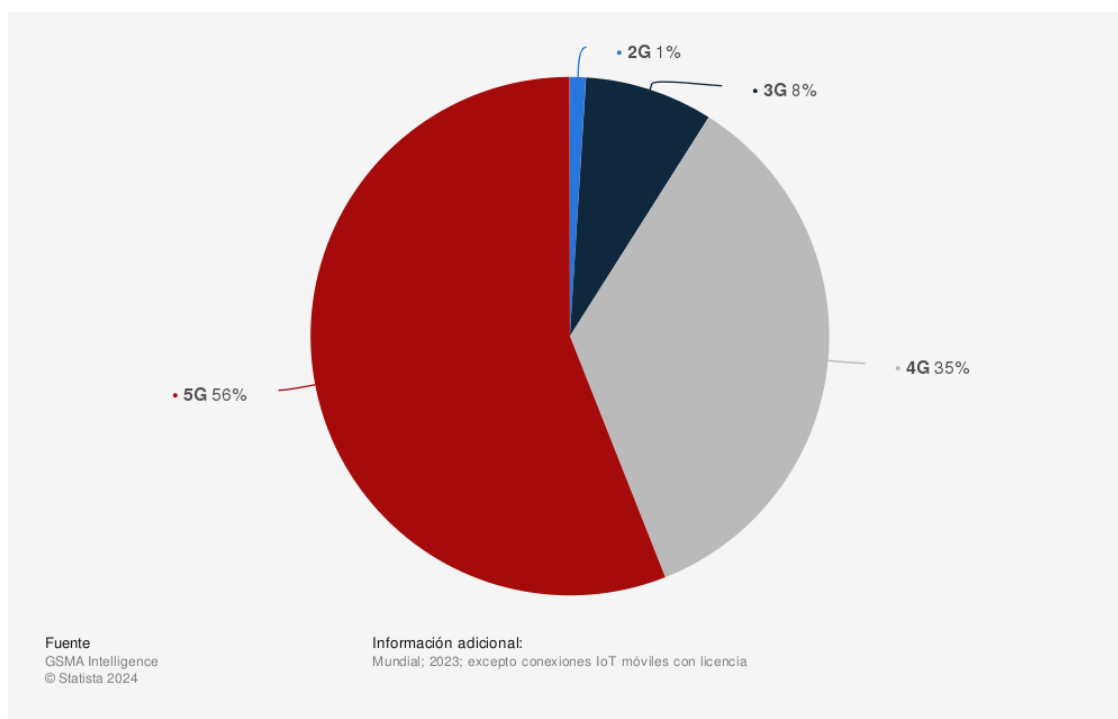


Figura 2.1: Distribución de los accesos a redes móviles de internet a nivel mundial en 2023, por generación [1].

En enero de 2024, el número de usuarios de internet en dispositivos móviles alcanzó el 69.4% de la población mundial, frente al 68% de 2023, lo que representa un incremento interanual del 2.5%, un incremento de 138 millones de personas. Además, el tiempo y uso de internet también ha evolucionado gradualmente, pasando de un promedio de 6 horas y 09 minutos en 2013 a 6 horas y 58 minutos en 2020.



Figura 2.2: Estadísticas globales sobre el número de usuarios y dispositivos conectados a internet [2].

Esta situación da paso a la actual y futura generación de redes móviles, 5G y 6G, con el objetivo de hacer frente al aumento del tráfico y al crecimiento en el número de dispositivos conectados al mismo tiempo. Estas tecnologías buscan conseguir aumentar las prestaciones de las generaciones anteriores, tales como reducir la latencia, aumentar la velocidad de transmisión máxima, o aumentar la eficiencia energética. La sexta generación promete superar de manera drástica a la quinta generación. Se espera que la velocidad de transmisión, se multiplique por 10, alcanzando los 1000 Gbps (Terabit por segundo), además de reducir aún más si cabe la latencia de 1 milise-gundo conseguida por 5G, a 0.1 milise-gundo, prácticamente a tiempo real. Por otro lado, se prevé una mejora del consumo energético de entre el 50 % y el 100 %, en parte gracias al menor consumo que requerirán los dispositivos en general, viéndose mejor optimizados.

El verdadero punto fuerte de estas tecnologías es su potencial transformador, que harán posible aplicaciones como vehículos autónomos, aplicaciones en la nube, realidad aumentada y extendida, industria 4.0 o comunicaciones holográficas, entre otras. Se espera que, en conjunto con los modelos de inteligencia artificial, revolucione la manera en que esta tecnología aprende, interactúa y se aplica.

Por el contrario, el despliegue del 6G traerá consigo algunos inconvenientes a los que se deberá hacer frente, tales como relativos a la seguridad y privacidad, dado que el mayor volumen de tránsito de datos e información transmitida provocará un mayor aumento de ataques, así como en la preocupación por parte de la población mundial. Además, esta tecnología requerirá una infraestructura de red más densa, con una instalación de antenas y estaciones base por todo el territorio, generando inquietudes acerca del impacto ambiental, la salud humana o la estética urbana.

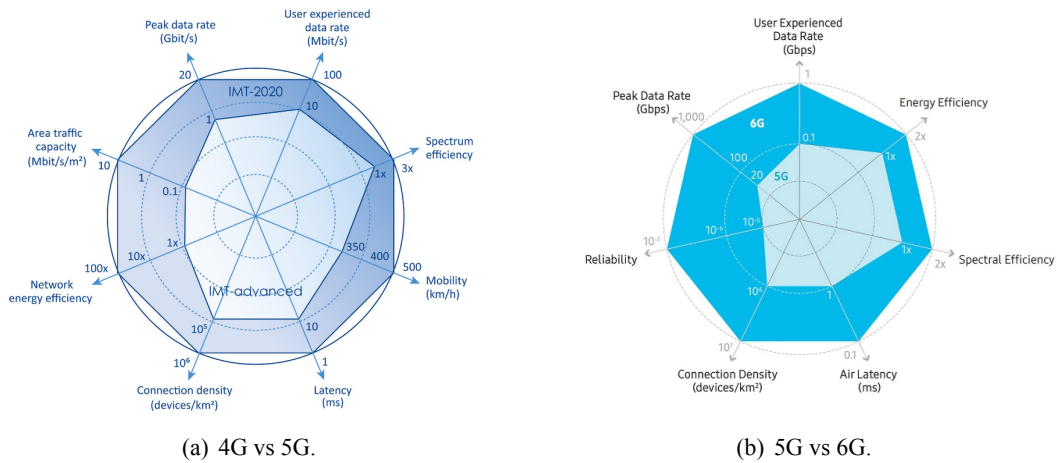


Figura 2.3: Comparación entre 4G, 5G y 6G [3].

La tecnología MIMO se perfila como una tecnología disruptiva esencial para las redes de comunicación 5G y una candidata prometedora para 6G, donde se anticipa un aumento significativo en el número de elementos en los conjuntos de antenas. Este incremento posibilita la creación de haces altamente direccionales, permitiendo atender a múltiples usuarios simultáneamente utilizando los mismos recursos de tiempo y frecuencia. Estos haces dirigidos permiten a las estaciones base (BTS) concentrar la potencia en los usuarios específicos, lo que reduce la necesidad de alta potencia de transmisión, minimiza las interferencias entre usuarios y mejora la eficiencia espectral.

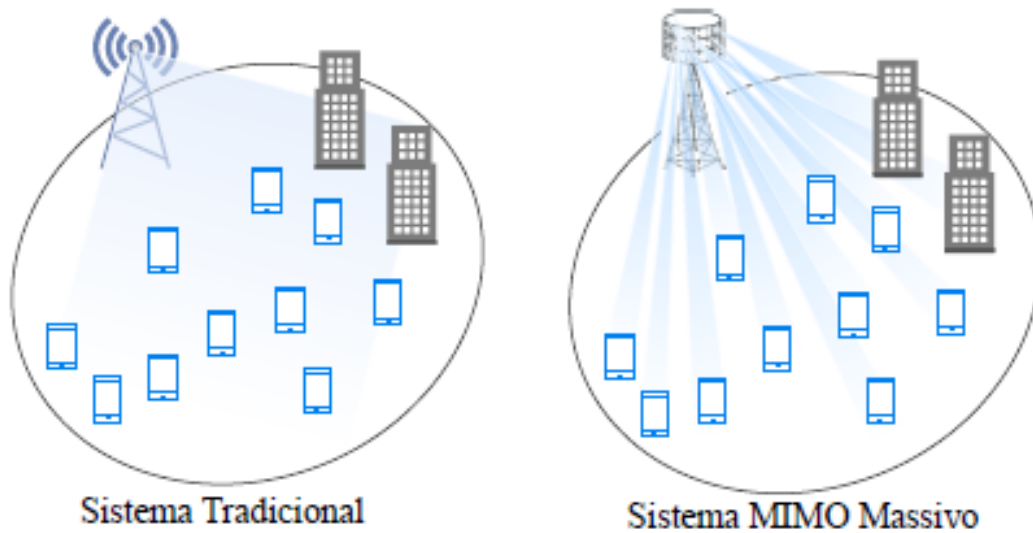


Figura 2.4: Comparativa del uso de MIMO masivo y un sistema tradicional.

El despliegue de sistemas MIMO masivos presenta varios retos importantes que deben ser abordados. Uno de los principales desafíos radica en la implementación y despliegue de grandes cadenas de radiofrecuencia (RF), así como en la degradación del rendimiento debido a deficiencias en el

hardware. Para reducir los costos económicos y el consumo de energía, se adoptan cadenas de RF de bajo coste, lo cual introduce imperfecciones como el desequilibrio *InPhase/Quadrature (I/Q)* o el ruido de fase. Por esta razón, es crucial desarrollar soluciones que puedan mitigar estos problemas de hardware. Estudios como [4] demuestran que el uso de hardware de alto coste y alto consumo de potencia puede ser sustituido eficazmente por el uso masivo de unidades paralelas de bajo coste y bajo consumo energético, operando de manera coherente. Esta estrategia permite sortear las imperfecciones del hardware y mantener un rendimiento óptimo del sistema.

El comportamiento del canal MIMO masivo, incluidas sus propiedades de correlación y la influencia de las diferentes configuraciones de antenas, solo puede comprenderse plenamente mediante una caracterización y modelización realista y precisa del canal. El interés en este ámbito ha aumentado considerablemente a lo largo de los últimos años. En [5], se demostró que el canal MIMO masivo no puede considerarse estacionario en sentido amplio, en comparación con el canal MIMO convencional. Por esta razón, los autores propusieron un modelo ampliado que pueda manejar matrices de gran tamaño. Esta ampliación es crucial para capturar la complejidad y dinámica del canal MIMO masivo, lo que permite un diseño más preciso y eficiente de las redes de comunicación.

En la modelización tradicional de canales MIMO, los dispersores tienden a aparecer en grupos de múltiples trayectorias de propagación de la señal con retardos y ángulos de llegada (AoA) y salida (AoD) similares, formando los llamados *clusters*. Aunque exista un gran número de objetos físicos, el número de *clusters* suele ser limitado. Las contribuciones de las componentes multitrayecto a menudo presentan cierta correlación, reduciendo el número de dispersores efectivos. Además, se ha demostrado que un *cluster* visto por diferentes usuarios puede introducir correlación entre ellos, incluso si están muy separados. Todavía se investiga si las matrices de antenas de gran tamaño permitirán identificar completamente los distintos *clusters*, aunque la alta resolución espacial que ofrecen estas matrices es prometedora para lograrlo [6].

Por otro lado, se considera un salto en el espectro radioeléctrico respecto a las generaciones anteriores. En el contexto de 5G, se presenta la denominada banda de frecuencias milimétricas, que comprende desde los 30 GHz hasta los 300 GHz, como la mayor de las bandas de su generación. En esta zona del espectro existen grandes porciones contiguas sin utilizar, lo que permite conseguir tasas binarias muy elevadas debido al gran ancho de banda disponible. Otra ventaja de trabajar en bandas de frecuencia altas implica que la longitud de onda es de menor tamaño, lo que se traduce a su vez en una reducción del tamaño físico de las antenas, lo cual, en el contexto de los sistemas MIMO masivos significa que, para un panel de antenas de las mismas dimensiones, se pueden emplear un mayor número de elementos, lo que permite conseguir haces más finos y precisos [7].

A pesar de que las ondas milimétricas ofrecen altas velocidades de datos, las características de propagación del canal serán muy diferentes en comparación con las de las bandas de frecuencia de las anteriores generaciones. El aumento de la frecuencia implica una mayor atenuación en la propagación en el espacio libre y una mayor susceptibilidad al *shadowing*. Estas deficiencias pueden mitigarse con la utilización de grandes paneles de antenas tanto en transmisión como en recepción, con el objetivo de conseguir altas ganancias por diversidad espacial y apuntamiento.

Es por ello de gran importancia la caracterización del canal radio para el diseño y planificación de este tipo de sistemas MIMO. Conocer el comportamiento del canal, sus beneficios y sus limitaciones, proporcionará las herramientas necesarias para explotar las oportunidades que pueden ofrecer las distintas bandas de frecuencias utilizadas en las nuevas generaciones móviles.

A pesar de que la tecnología MIMO lleva años asentada en el contexto del estándar 5G, aún existen numerosos retos y desafíos que aumenten y mejoren las prestaciones de 5G y den paso hacia 6G, como las simplificaciones de modelado realizadas en el mundo académico que pueden impedir una transferencia directa de la teoría a la práctica, o la consideración de nuevas aplicaciones de grandes conjuntos de antenas como pueden ser las Superficies Inteligentes Reconfigurables (*Reconfigurable Intelligent Surfaces, RIS*). Además de su uso en el sector de las comunicaciones móviles, la tecnología MIMO puede utilizarse también en otros campos, como las comunicaciones de máquinas de bajo consumo, o aplicaciones de detección y posicionamiento de sistemas radar.

Capítulo 3

Regulación e impacto socio-económico

3.1. Paradigma internacional

Aunque la implementación de los sistemas 5G aún está en desarrollo, la investigación hacia los sistemas móviles de sexta generación ya ha comenzado. Se espera que el 6G se estandarice y comience su despliegue en 2030, aunque las primeras aplicaciones podrían adelantarse a partir de 2026, impulsadas por la competencia actual en el sector, dominada por China, Estados Unidos y Corea del Sur, así como por la creciente implicación de Europa [8].

La razón de esta investigación temprana radica en que, por lo general, una nueva tecnología requiere más de una década para llegar al mercado comercial. Organismos de estandarización como el 3GPP subrayan que el desarrollo de una nueva generación de móviles es un proceso de varios años y planifican el trabajo para las especificaciones del 6G con suficiente antelación. Por lo tanto, es fundamental establecer una visión de las futuras comunicaciones para orientar la investigación y el desarrollo en este campo.

El 6G se prevé como una evolución significativa que no solo mejorará el ancho de banda móvil para los consumidores, sino que también permitirá la Cuarta Revolución Industrial, o Industria 4.0, a través de la digitalización y conectividad de todos los objetos, grandes y pequeños. Un aspecto crucial de esta digitalización será la creación de gemelos digitales en la nube, formando la base esencial del mundo digital del futuro. Los gemelos digitales de entidades físicas y biológicas serán una plataforma esencial para los nuevos servicios digitales del futuro, requiriendo una enorme capacidad y baja latencia para representar con precisión el mundo físico en todo momento [9].

Por ello, el objetivo es desarrollar una nueva forma de transmitir información de manera inalámbrica que aumente la velocidad de transmisión de datos por diez, reduciendo la latencia a 0,1 milisegundos, prácticamente en tiempo real. En este sentido, el proveedor de equipos de medición y prueba electrónica Keysight Technologies ha priorizado este desarrollo. Asimismo, empresas líderes como LG, Huawei, Nokia y Samsung están dedicadas a la investigación y desarrollo de la tecnología 6G.

En este proceso se alcanzará un estado intermedio conocido como 5G+ o 5G avanzado, que llegará al mercado en 2024. Huawei lo denomina 5.5G y afirma que, gracias a la tecnología MIMO, se alcanzarán velocidades de hasta 10 Gbps. Por otro lado, Samsung sugiere considerar todas las bandas disponibles para 6G, desde la banda baja (por debajo de 1 GHz), pasando por la banda

media (1-24 GHz) y hasta la banda alta (24-300 GHz). En esta competencia, grandes empresas europeas de telecomunicaciones como Telefónica, Deutsche Telekom, Vodafone, Telecom Italia y Orange, han solicitado a la UE la implementación de redes Open RAN en el continente, con el objetivo de liderar no solo en 5G, sino también en 6G [10].

La inteligencia artificial (IA) y el aprendizaje automático (ML) no solo mejorarán la eficiencia de la red, sino que también serán cruciales para la creación de nuevas aplicaciones y servicios. Estas tecnologías permitirán una automatización avanzada, el análisis en tiempo real de grandes volúmenes de datos y la optimización de los recursos de la red. La IA y el ML serán vitales para gestionar la complejidad de las redes 6G, facilitando a los operadores la oferta de experiencias personalizadas y servicios más inteligentes.

El 6G aprovechará nuevas bandas de espectro, incluyendo frecuencias superiores a 100 GHz. Estas bandas proporcionarán un ancho de banda mucho mayor, esencial para soportar aplicaciones con alta demanda de datos como la realidad virtual y aumentada, y la transmisión de vídeo en 8K. Sin embargo, el uso de estas frecuencias también traerá consigo una serie de desafíos, como afrontar una mayor atenuación de la señal o la necesidad de utilizar tecnologías de antenas avanzadas para garantizar una cobertura adecuada.

Uno de los aspectos más críticos es la seguridad, que requiere de tecnología avanzada para salvaguardar la información personal de los usuarios en un mundo cada vez más interconectado. Además, se desarrollarán sistemas de confianza para garantizar que los datos y las comunicaciones sean íntegros y auténticos.

También será esencial en el despliegue del 6G asegurar un acceso global amplio, que atienda las demandas económicas y sociales de la nueva era. Resulta fundamental que esta tecnología sea accesible para el mayor número de personas posible y que su costo sea asequible.

Además de lo mencionado, el 6G ofrecerá beneficios adicionales. En un contexto global que requiere acciones decididas contra la crisis climática, el 6G promete reducir significativamente el consumo de energía, superando los avances logrados por el 5G, el cual ya ha logrado una disminución del 90 % en el consumo eléctrico en comparación con el 4G.

Asimismo, los avances tecnológicos a menudo están vinculados con la búsqueda de la superioridad militar, un objetivo en el que tanto China como Estados Unidos ya están invirtiendo esfuerzos. Un informe del Instituto Internacional de Estudios Estratégicos (IISS) destaca que China está adoptando un enfoque de mando centralizado en la aplicación de la tecnología 6G con propósitos militares.

Para asegurar que Europa no se quede atrás y mantenga su liderazgo tanto en el 5G como en el futuro 6G, las principales compañías europeas de telecomunicaciones han instado a los responsables políticos, los estados miembros de la UE y otros actores del sector, a colaborar y priorizar urgentemente la implementación de la red de acceso radio abierta (Open RAN). Para que la UE conserve su competitividad, liderazgo tecnológico y resiliencia, es crucial tomar medidas decisivas y trabajar en conjunto de inmediato. De no hacerlo, "Europa corre el riesgo de quedarse atrás con respecto a Norteamérica y Asia en el desarrollo y despliegue de las redes de próxima generación", según indica un informe de Telefónica [10].

Por todo lo comentado hasta ahora, surge la necesidad de establecer una legislación y normativa clara para que este despliegue quede respaldado por la sociedad y organizaciones nacionales e internacionales.

3.2. Legislación nacional

Para garantizar un desarrollo organizado y asegurar la calidad del servicio en las comunicaciones móviles, tanto en el sector público como en el privado, es fundamental mantener un estricto control sobre el espectro electromagnético. Este enfoque ayuda a evitar superposiciones que podrían generar interferencias significativas, complicando la efectividad de las comunicaciones y sus aplicaciones prácticas. Por este motivo, los gobiernos y las entidades responsables de la normalización tecnológica implementan políticas para proteger y gestionar el uso del espectro. Estas políticas incluyen la asignación cuidadosa de frecuencias a diferentes servicios y operadores, asegurando que haya suficiente espacio para bandas de frecuencia sin interferencias, reservadas exclusivamente para usos autorizados. La siguiente ilustración muestra el espectro utilizado predominantemente por las tecnologías de comunicación[11].

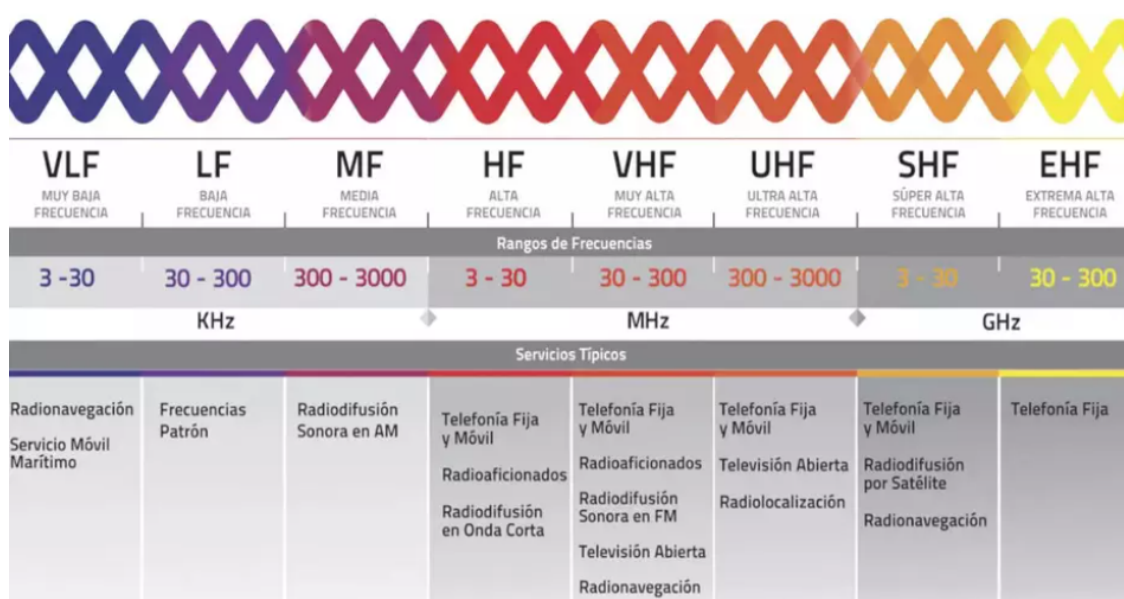


Figura 3.1: Espectro radioeléctrico [12].

En España, el organismo encargado del ordenamiento del espectro se denomina Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias (CNAF), el cual contiene la atribución o uso a que se reserva cada una de las bandas de frecuencia en las que se divide el espectro radioeléctrico disponible para radiocomunicaciones, entre 8,3 kHz y 3000 GHz.

El CNAF fue publicado por primera vez en 1990 y requiere actualizaciones periódicas debido a la naturaleza regulatoria y altamente técnica de la información sobre el uso del espectro radioeléctrico. Estas actualizaciones suelen estar vinculadas a las actividades de organismos internacionales con autoridad reguladora, a los cuales España pertenece. Entre estos organismos se encuentran la UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones), la CEPT (Conferencia Europea de Administraciones de Correos y Telecomunicaciones), la UE (Unión Europea) y el ETSI (Instituto Europeo de Normas de Telecomunicación). Estos organismos aprueban reglamentos, decisiones, recomendaciones y otras disposiciones orientadas principalmente a armonizar el uso del espectro radioeléctrico [13].

La versión más reciente del CNAF, aprobada mediante la Orden ETD 1449/2021 de 16 de diciembre, fue publicada en el Boletín Oficial del Estado el 24 de diciembre de 2021. Esta nueva edición deroga y reemplaza la versión anterior de 2017, así como sus modificaciones parciales de 2018 y 2020.

Además de esto, es crucial considerar las necesidades específicas de la industria española y del sector de las telecomunicaciones en general. Esto incluye las implicaciones que surgen de la introducción de nuevos sistemas y dispositivos, ya sea para reemplazar tecnologías existentes o como innovaciones completamente nuevas que operan en frecuencias específicas con características distintas.

3.3. Estándares técnicos

Para establecer una red con estas características, es esencial ejecutar un plan de desarrollo que defina los estándares finales. Diversas organizaciones están encargadas de este proceso de estandarización, siendo una de las más destacadas a nivel global el 3GPP (3rd Generation Partnership Project). El 3GPP no solo ha liderado la estandarización y despliegue de tecnologías previas como LTE, UMTS y GSM, sino que también se ha comprometido a desarrollar las especificaciones para el próximo estándar, 6G, hacia finales de 2023.

Para reforzar este compromiso, durante las reuniones celebradas en marzo de 2024 en Maastricht, Países Bajos, se logró un significativo avance al establecer un calendario para la normalización de esta tecnología emergente [14].

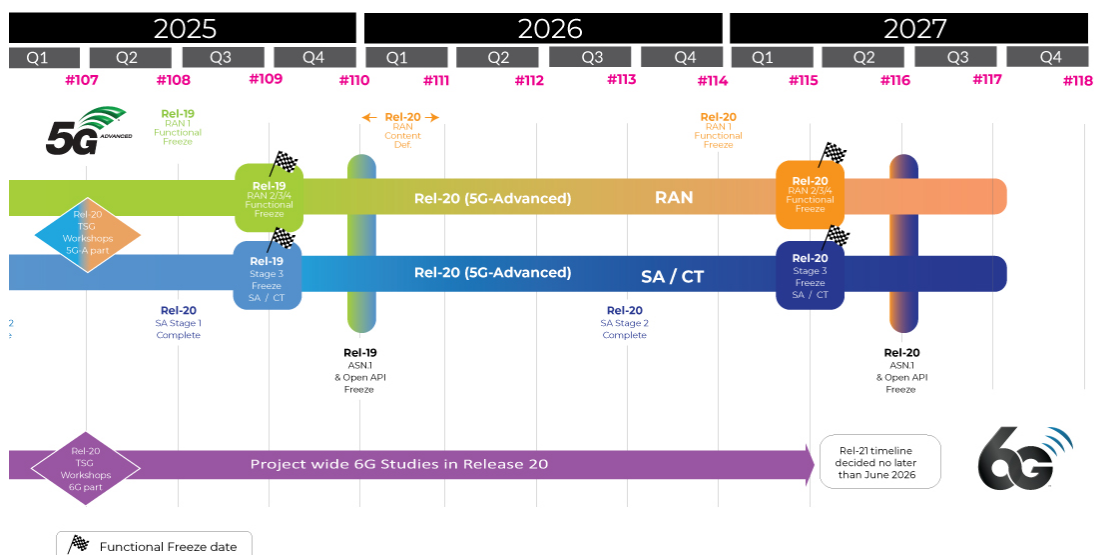


Figura 3.2: Fases de lanzamiento del estándar 6G. Cronología 3GPP [15]

El trabajo del 3GPP se organiza típicamente en versiones y lanzamientos, donde al final de cada versión se actualizan las especificaciones para reflejar los avances realizados. Para las nuevas generaciones, como el caso del 5G que comenzó con la versión 14 y finalizó las primeras especi-

caciones en la versión 15, el trabajo se extiende a través de múltiples lanzamientos. En el caso del 6G, los trabajos iniciarán en 2024 con la versión 19 y se espera que las primeras especificaciones estén completas hacia finales de 2028, con la versión 21. Según el calendario aprobado, se anticipa que el sistema comercial inicial estará disponible en el mercado para 2030.

Es importante destacar que mientras se establecen estas nuevas especificaciones, la evolución del 5G continuará a lo largo de varias versiones, desarrollando tecnologías que faciliten una transición fluida hacia la sexta generación.

En relación con los estándares para la tecnología de MIMO Masivo, aún en fase de desarrollo y con prototipos en curso, no existen estándares establecidos actualmente. Establecer estos estándares es una tarea fundamental para las organizaciones responsables. El primer prototipo de MIMO-OFDM fue desarrollado por los Laboratorios Bell en 1998, pero no fue hasta 2008 cuando se introdujo oficialmente el estándar IEEE 802.11n, basado en tecnologías MIMO [11].

3.4. Impacto económico

La baja latencia que se espera de las nuevas generaciones de tecnología fomentará aún más la adopción y expansión de tecnologías como el Internet de las Cosas (IoT). En este contexto, tanto los múltiples dispositivos como las estaciones base aprovecharán tecnologías como el MIMO masivo para garantizar escalabilidad y eficiencia óptimas. Esta tendencia no solo está en la vanguardia de la transformación digital de la economía, sino que también está transformando las operaciones tanto de empresas como de gobiernos. En la figura 2.3 se muestra una imagen de IOT ANALYTICS en la cual se refleja el aumento del valor económico potencial que IoT podría generar a lo largo de los próximos años, con unas expectativas para 2027 de 483.000 millones de dólares en todo el mundo.

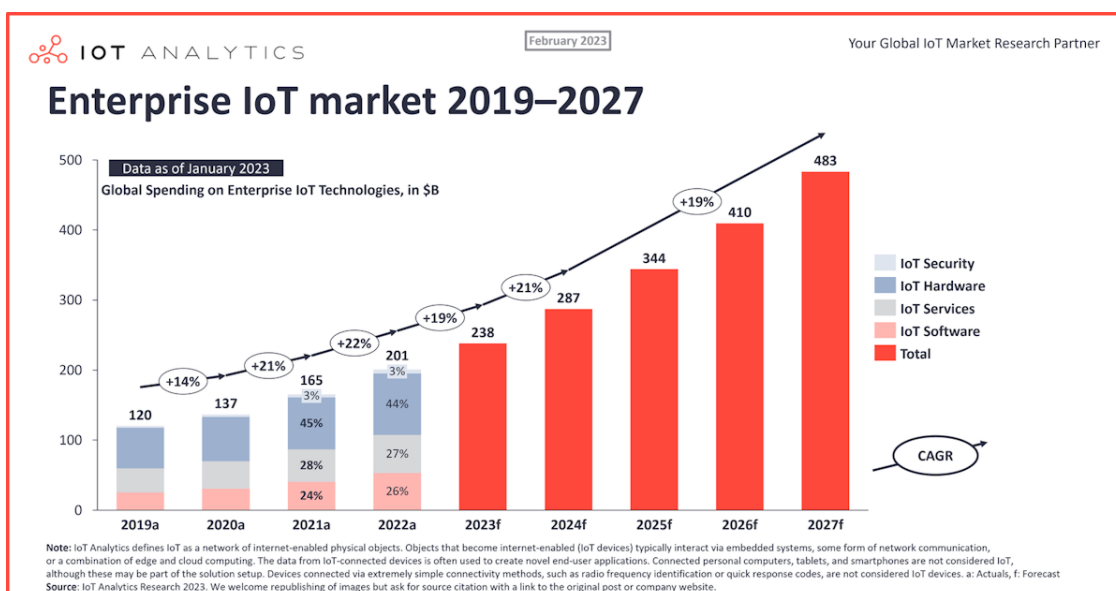


Figura 3.3: Crecimiento del mercado global de IoT [16]

Los sectores que más se beneficiarán serán la industria, que representará aproximadamente el 26 % del valor económico potencial para 2030, y el sector de la salud, que alcanzará alrededor del 12 %.

Se prevé que la implementación de 6G en entornos B2B (Business-to-Business) abarque cerca del 65 %, superando las aplicaciones destinadas al consumo personal [17].

El desarrollo de 6G permitirá utilizar bandas de frecuencia más altas sin sufrir las limitaciones de capacidad actuales, lo que impulsará cambios estratégicos significativos en las empresas.

Históricamente, la evolución tecnológica ha llevado consigo una reducción en los costos de las conexiones a internet, facilitando así su acceso a una mayor parte de la sociedad.

3.5. Impacto medioambiental

El Internet de las Cosas representa una oportunidad significativa para la digitalización de diversos sectores y para generar beneficios sociales, incluyendo la lucha contra el cambio climático mediante la promoción de la sostenibilidad. Los dispositivos IoT ofrecen soluciones positivas como la conservación del agua y la eficiencia energética, contribuyendo así a alcanzar los objetivos de desarrollo sostenible establecidos por las Naciones Unidas en la Agenda 2030, según destaca el informe del Foro Económico Mundial [18].

La interconexión y la recopilación en tiempo real de datos provenientes de múltiples máquinas abren numerosas posibilidades para mejorar la sostenibilidad y fomentar la eficiencia en el uso del agua. Mediante sensores e infraestructuras de comunicación, es posible recolectar información sobre el consumo de agua y utilizar estos datos para tomar decisiones informadas y diseñar estrategias sostenibles. Por ejemplo, la aplicación de sensores puede optimizar el riego de cultivos según las condiciones climáticas y la humedad del suelo, mejorando así el rendimiento agrícola.

Además, la automatización mediante sensores, algoritmos y redes de comunicación permite distribuir la energía de manera más eficiente y ajustada a las necesidades reales. Esto facilita la predicción de la demanda eléctrica en entornos urbanos e industriales.

Según el informe del Foro Económico Mundial, la adopción de la denominada "energía inteligente", que emplea redes de información y sensores IoT para el almacenamiento y distribución eficientes de la energía, podría resultar en un ahorro energético superior a 1.300 millones de MWh para el año 2030. Esta transformación tecnológica también promueve la integración de energías renovables y la reducción de costos.

Para alcanzar estos niveles de eficiencia energética, es crucial que los centros urbanos principales adopten la digitalización para satisfacer sus necesidades eléctricas. Edificaciones, infraestructuras e industrias deben conectarse a través de tecnologías IoT para promover la movilidad inteligente y sostenible. Estas estrategias no solo pueden reducir el consumo energético, sino también mejorar la calidad del aire en las ciudades y disminuir las emisiones de CO₂.

Sin embargo, es importante reconocer los desafíos asociados al aumento del uso de dispositivos inteligentes, como el incremento de residuos de aparatos electrónicos conocido como basura electrónica o e-waste. Abordar estos desafíos requerirá cambios en los modelos de negocio hacia sistemas que favorezcan la reutilización y el diseño de componentes electrónicos reciclables.

El aumento de dispositivos conectados también conlleva un incremento en el consumo energético. En el caso del MIMO masivo, que emplea un gran número de antenas y consume significativa energía, especialmente en las estaciones base, esta situación podría impulsar la transición hacia el uso de energías renovables.

Además, el uso de nuevas bandas del espectro electromagnético, incluyendo frecuencias altas previamente no utilizadas, ha generado preocupación en algunos sectores de la población respecto a la exposición directa a este tipo de ondas. Aunque hasta la fecha no existen evidencias científicas concluyentes que indiquen que la exposición continua a estas ondas electromagnéticas pueda ser perjudicial para la salud humana, es crucial estudiar estos posibles riesgos a largo plazo debido a la falta de información prolongada al respecto.

En resumen, el Internet de las Cosas ofrece una cantidad de oportunidades para avanzar hacia una sociedad más sostenible y eficiente, aunque también plantea desafíos que deben ser abordados con innovación y compromiso global.

Capítulo 4

Marco teórico

4.1. Sistemas MIMO

Los sistemas MIMO (Multiple Input, Multiple Output) hacen referencia a una tecnología basada en el uso de múltiples antenas tanto en transmisión como en recepción, con el objetivo de incrementar la eficiencia de las comunicaciones inalámbricas. Uno de los principios fundamentales de MIMO radica en aprovechar la propagación multicamino para combinar las múltiples versiones de las señales que se propagan simultáneamente y a la misma frecuencia por el mismo canal, con el fin de aumentar las probabilidades de recibirlas sin verse gravemente afectadas por las atenuaciones del camino.

De este modo, aprovechando la diversidad espacial de antenas, en conjunto con algoritmos de procesamiento de las señales, se consiguen aumentar los niveles de capacidad del canal, la velocidad de transmisión y la fiabilidad del sistema, sin necesidad de requerir mayor ancho de banda o potencia transmitida.

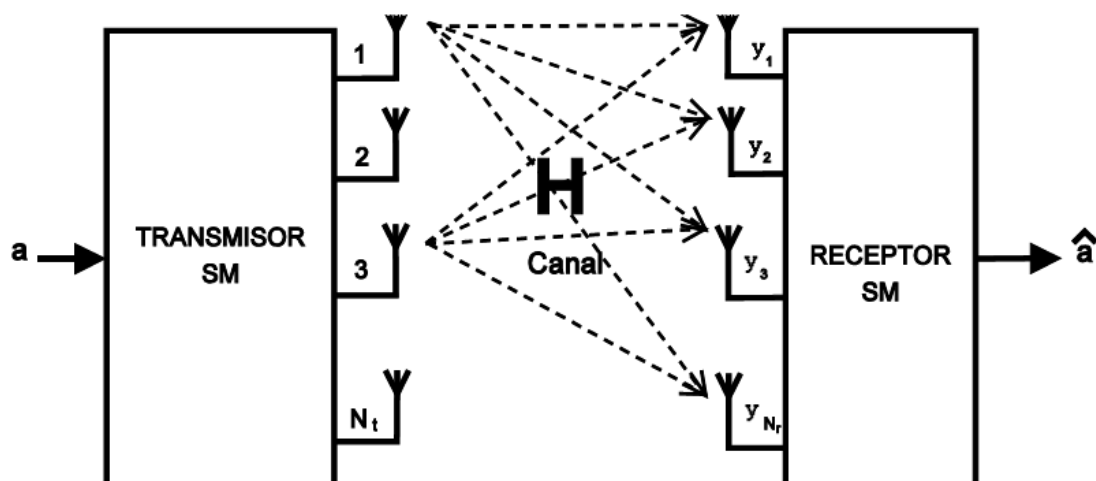


Figura 4.1: Sistema MIMO punto a punto [19].

Los sistemas MIMO cuentan con M antenas en el transmisor y K antenas en el receptor. El número de canales resultante es el producto de las antenas en cada uno de los extremos del enlace. En la figura 4.2 se representa un sistema MIMO punto a punto, debido a que cada usuario dispone de un bloque tiempo-frecuencia para su comunicación con la estación base.

Una limitación notable de los sistemas MIMO punto a punto radica en su baja escalabilidad. En estándares como el IEEE 802.11ac, se impone un máximo de 8 antenas tanto para la transmisión como para la recepción. Esta restricción se debe a que en entornos donde predominan las líneas de visión directa (LOS) y hay pocas componentes multicamino, el canal de radio puede no soportar de manera efectiva 8 flujos de datos independientes. Esto ocurre porque la señal principal en cada canal sería la línea de visión directa, lo que haría que los canales no fueran realmente independientes.

Además, el aumento en el número de antenas incrementa el tiempo requerido para que el receptor calcule la matriz de canal a través del entrenamiento con señales piloto. Por otra parte, los dispositivos terminales necesitarían componentes electrónicos independientes para cada una de las antenas, lo que añade complejidad y costo al sistema. [3].

En caso de existir un mayor número de usuarios, se realizarán varias comunicaciones punto a punto, asignándose un bloque tiempo-frecuencia diferente a cada uno de los usuarios. Este tipo de sistema se conoce como MIMO multiusuario.

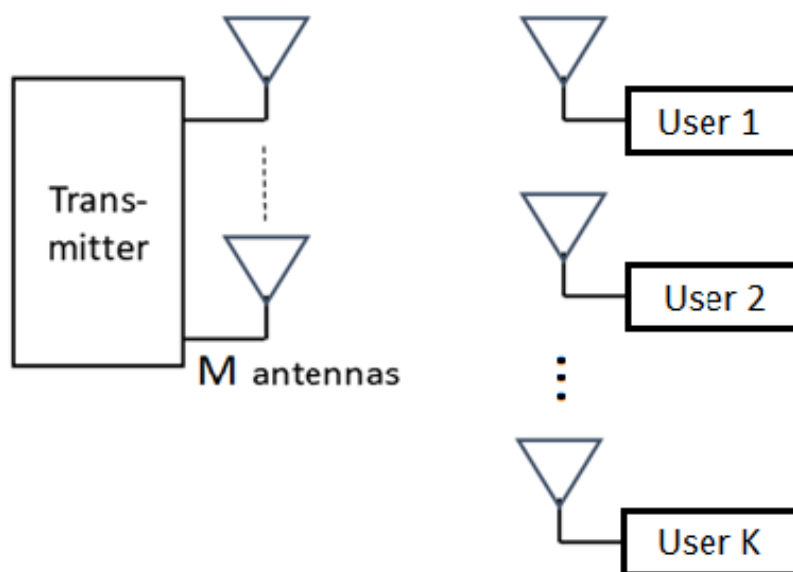


Figura 4.2: Sistema MIMO multiusuario [3].

Una de las principales ventajas de estos sistemas respecto al punto a punto reside en la utilización de una sola antena en los terminales receptores, simplificando su complejidad y abaratando costes. Además, presentan una dependencia menor con el entorno de propagación, debido a una mayor separación entre los usuarios, funcionando incluso en entornos LOS. En cambio, se mantiene el problema de la escalabilidad, debido a que el tiempo de obtención de la información del canal sigue siendo proporcional al número de antenas [20].

A modo comparativo de los sistemas MIMO respecto a aquellos que solo cuentan con una sola antena, ya sea en transmisión, en recepción o en ambas, en la siguiente figura se muestra como MIMO ofrece niveles mayores de capacidad para un mismo ancho de banda y potencia transmitida.

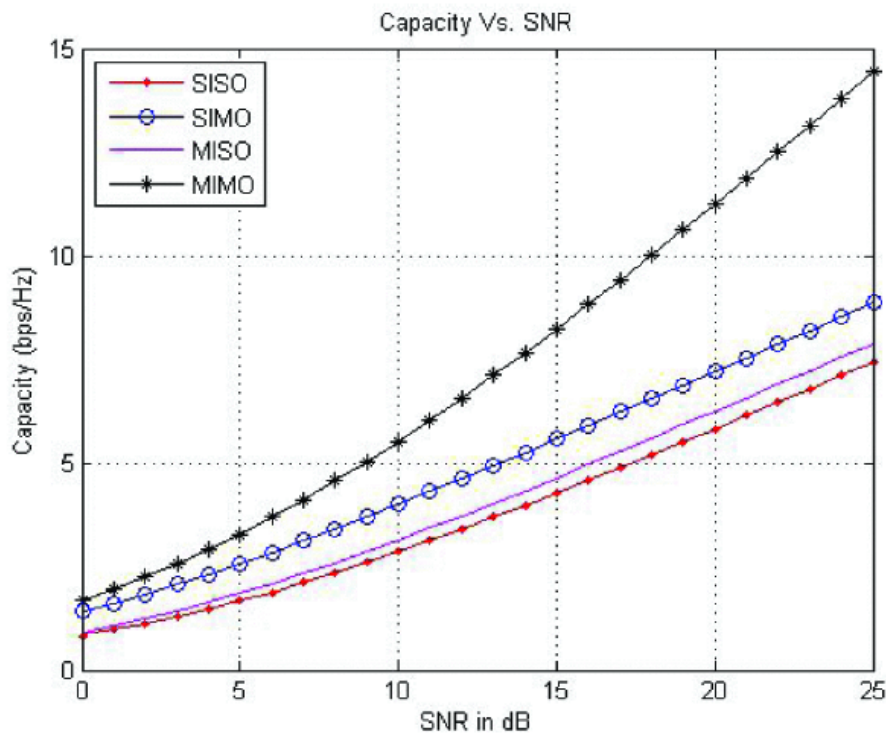


Figura 4.3: Comparación entre distintas configuraciones de sistemas [21].

Las principales técnicas de transmisión que utiliza la tecnología MIMO puede dividirse en tres categorías principales: diversidad de antenas, multiplexación espacial y beamforming.

4.1.1. Diversidad de antenas

Los sistemas MIMO aprovechan la diversidad espacial para mejorar las prestaciones del sistema mediante el uso de múltiples antenas en un mismo transmisor o receptor. Esta diversidad puede ser en recepción o en transmisión, dependiendo de qué extremo de la comunicación se implemente.

La diversidad en recepción fortalece la señal al reducir el desvanecimiento, aprovechando las variaciones en la señal recibida por antenas separadas por al menos media longitud de onda. Cuando la separación entre antenas receptoras es suficiente, el desvanecimiento experimentado por cada canal se vuelve independiente, lo que significa que es poco probable que ambas señales sufran desvanecimiento simultáneo. Por lo tanto, el éxito de este esquema de diversidad está determinado por el grado de correlación entre las distintas ramas del sistema[22].

Existen tres técnicas principales para combinar las señales de las antenas receptoras.

- **Diversidad por selección (Selection combining):** En este esquema sólo la señal con mejor SNR se pasa al decodificador. Este algoritmo se utiliza en receptores simples con pocos requerimientos de procesamiento.

- **Combinación de igual ganancia (Equal Gain Combining):** Realiza una combinación lineal de todas las antenas receptoras pesadas por un mismo factor, independientemente de la amplitud de la señal.
- **Combinación por razón máxima (Maximal Ratio Combining):** Método similar al de combinación de igual ganancia (EGC) con la diferencia de que las antenas se pesan con un factor proporcional a la amplitud de la señal. Este esquema es el que obtiene una SNR óptima con la desventaja de que su diseño es más complejo que el del EGC.

En los esquemas de diversidad, suelen surgir dos tipos principales de problemas. El primero de ellos son los problemas asociados con errores en la combinación. Estos errores ocurren cuando los pesos utilizados para extraer la mejor relación señal-ruido (SNR) no son seleccionados adecuadamente, lo que puede resultar en una degradación del desempeño del sistema.

El segundo tipo de problema se relaciona con la correlación entre las antenas. Cuando existe una alta correlación compleja, por ejemplo, con un coeficiente de módulo 0.9, la ganancia del sistema de diversidad por selección puede disminuir significativamente. Por ejemplo, en un sistema de diversidad por selección, la ganancia puede reducirse de 10 dB a 7 dB bajo estas condiciones. Mientras tanto, en un sistema MRC (Maximum Ratio Combining), la reducción sería de 11.5 dB a 8 dB.[23].

Las técnicas de diversidad en transmisión más comunes utilizan la precodificación de los elementos de antena de transmisión para aumentar las posibilidades de que las señales recibidas no estén correlacionadas, lo que mejora el éxito de las técnicas de diversidad en el receptor. Se basan en la transmisión de copias retardadas en el tiempo por cada una de las antenas, aumentando el multicamino de una manera artificial. El inconveniente de este esquema es que al necesitarse dos tiempos por símbolo, la tasa de código es de $1/2$.

4.1.2. Multiplexación espacial

La multiplexación espacial implica la transmisión de flujos de información independientes a través de cada antena, utilizando el mismo ancho de banda y el mismo intervalo temporal. Esta técnica aprovecha la propagación multicamino para incrementar la decorrelación entre los canales, permitiendo así la separación efectiva de los distintos flujos de información y aumentando la tasa de transmisión.

El orden de multiplexación espacial se refiere al número de flujos transmitidos simultáneamente, limitado por el menor número de antenas en transmisión o recepción. Es fundamental destacar que este esquema depende del concepto de diversidad de antenas en ambos extremos del sistema de comunicación. Sin embargo, a diferencia de otros métodos, la multiplexación espacial no requiere conocer el estado instantáneo del canal para operar eficazmente.

4.1.3. Formación de haces (Beamforming)

El beamforming convencional es una técnica de procesamiento de señales empleada para controlar el patrón de radiación de una antena, utilizada tanto en transmisión como en recepción. Su objetivo principal es aumentar la directividad de la antena transmisora hacia una dirección específica, al

mismo tiempo que minimiza la ganancia en otras direcciones. En recepción, se utiliza para incrementar la sensibilidad del receptor hacia la dirección de la señal deseada, reduciendo interferencias y ruidos provenientes de otras direcciones.

Esta técnica optimiza la relación señal-ruido (SNR) y, por consiguiente, mejora el rendimiento del sistema de comunicación. Para su implementación efectiva, es crucial disponer de conocimiento previo del canal de comunicación. El beamforming convencional se emplea típicamente en esquemas de duplexación por división de tiempo (TDD, por sus siglas en inglés), donde el enlace ascendente y descendente comparten la misma banda de frecuencias. Esto permite que el receptor envíe una señal piloto que las estaciones base utilizan para adaptar de manera dinámica el haz óptimo de transmisión o recepción.

4.2. MIMO Masivo

Uno de los cambios fundamentales introducidos por la cuarta generación de comunicaciones fue la adopción de *arrays* de antenas bidimensionales (2D). Esta innovación permitió la creación de bloques o paneles de antenas más compactos y eficientes, manteniendo el mismo número total de antenas. Como resultado, se logró la capacidad de dirigir haces de manera simultánea tanto en horizontal (acimut) como en vertical (elevación), lo que implica la necesidad de modelar el canal de propagación en tres dimensiones (3D).

Este avance en el modelado del canal representa un cambio significativo respecto a las generaciones anteriores, donde la mayoría de los sistemas solo consideraban la propagación en dos dimensiones. La capacidad de direccionamiento en 3D proporciona una mejora considerable en la capacidad y la eficiencia espectral de los sistemas de comunicación, permitiendo una mejor adaptación a diferentes condiciones de propagación y escenarios de despliegue.

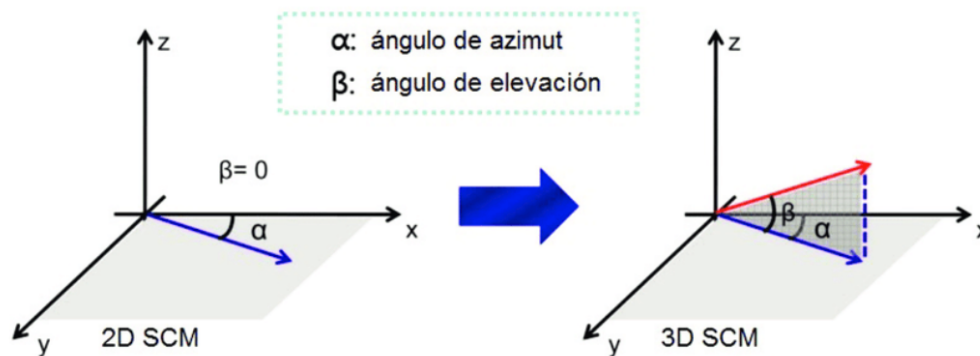


Figura 4.4: Concepto de evolución del modelo espacial de canal 2D a 3D [24].

La explotación de una nueva dimensión proporciona grandes ventajas en escenarios con alta densidad de edificios, así como elevada concentración de usuarios, mediante la posibilidad de utilizar técnicas como el conformado de haz (beamforming) espacial, esenciales para ganar cobertura y mitigar los efectos de las interferencias, o el uso de la ganancia por diversidad y multiplexación espacial.

Una forma efectiva de mitigar los efectos de desvanecimiento en las señales es proporcionar al receptor múltiples copias de la señal transmitida, idealmente independientes entre sí. Cuanto mayor sea el orden de diversidad (es decir, el número de antenas utilizadas), mayor será la cantidad de copias que llegarán al receptor. Esto aumenta la probabilidad de recibir al menos una copia de la señal que no haya sido afectada por desvanecimiento severo, mejorando así la calidad y la fiabilidad de la recepción. En un sistema con M antenas transmisoras y N antenas receptoras, se generan $M \times N$ enlaces independientes, lo que proporciona una diversidad espacial de orden $M \times N$.

Por otro lado, la multiplexación espacial permite la transmisión de múltiples flujos de datos independientes simultáneamente, lo que resulta en un aumento significativo de la tasa de transferencia de datos. Cada flujo de datos experimenta la misma calidad de canal que tendría en un sistema de antena única (SISO), pero con su capacidad mejorada por un factor igual al número mínimo entre las antenas transmisoras y receptoras.

Como solución a solventar los problemas de escalabilidad MU-MIMO, surge una evolución denominada MIMO masivo o Terabit-MIMO (T-MIMO), considerada como una de las bases de las nuevas generaciones de comunicaciones. T-MIMO da un paso más allá en cuanto a la utilización del número total de antenas, considerablemente mayor, del orden de las centenas, consiguiendo reducir la potencia necesaria, logrando un mejor servicio y simplificando el procesado de las señales.

T-MIMO, a diferencia de las tecnologías mencionadas anteriormente, no se basa en la multiplexación por división en el tiempo o en la frecuencia, sino en la multiplexación por división espacial. Esta técnica utiliza antenas controladas de manera independiente, compartiendo el mismo espectro de frecuencias y utilizando el mismo intervalo temporal. Una de las fortalezas de esta tecnología radica en el uso de estimaciones directas del canal radioeléctrico en lugar de depender de suposiciones previas sobre cómo se comporta el canal. En entornos abiertos, los flujos de datos se transmiten de manera más enfocada, mientras que en entornos más densos, los flujos pueden seguir diferentes trayectorias. A medida que aumenta el número de antenas, la directividad hacia los usuarios se vuelve más selectiva y potente, lo que permite que los flujos se sumen constructivamente en los puntos deseados y se cancelen destructivamente en otros donde no se necesitan.

La realización de esta multiplexación espacial es posible gracias a la asunción de reciprocidad del canal, lo que significa que se puede conocer el estado completo del canal utilizando solo la información del enlace ascendente o descendente, que teóricamente son idénticos. Esto permite a la estación base obtener información sobre la respuesta en frecuencia del canal hacia cada usuario, facilitando así la asignación óptima de los flujos de señal transmitidos por las antenas.

4.3. Caracterización de canal

La caracterización de canal es esencial para comprender y optimizar el rendimiento de los sistemas MIMO. El canal inalámbrico es un medio complejo y variable que influye en la transmisión de señales entre el transmisor y el receptor. La caracterización de canal es el proceso de obtención de la información de canal (*Channel State Information CSI*), es decir, el estudio de la respuesta del canal, que describe cómo la señal transmitida se degrada y se distorsiona durante su viaje a través del medio inalámbrico.

Como se ha comentado anteriormente, T-MIMO basa sus comunicaciones entre emisor-receptor en medidas reales del canal de propagación. Su procedimiento consiste en que uno de los extremos

del sistema transmita señales de entrenamiento conocidas para que el otro extremo pueda caracterizarlas. Así, estimados los canales del enlace, el CSI resultante se utiliza a lo largo de un intervalo de tiempo que dura hasta que el movimiento de los usuarios altera el canal significativamente. De este modo, se plantea un protocolo por el que los usuarios que hay en la celda en un momento determinado se sincronizan para transmitir señales de datos a través del Up-link, seguidas de las cuales transmiten las secuencias de pilotos, que son utilizadas por la estación base para determinar el CSI, que se utiliza para detectar las señales de datos recibidas previamente, al tiempo que se produce la generación de los haces para la transmisión a través del Down-link [20].

En los sistemas MIMO, el canal puede modelarse como una matriz de dimensiones M antenas transmisoras por N antenas receptoras, donde cada elemento representa la suma de los coeficientes de canal (amplitud y fase) entre cada par de elementos transmisores receptores.

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1Nt} \\ h_{21} & h_{22} & \dots & h_{2Nt} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ h_{Nr1} & h_{Nr2} & \dots & h_{NrNt} \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

$$h_{ij} = \sum_{n=1}^N a_n e^{-j\theta_n} \quad (4.2)$$

A diferencia de MIMO convencional, los parámetros de las componentes multicamino, como los ángulos de llegada (AoA), los ángulos de salida (AoD), el ensanchamiento angular y el ensanchamiento temporal, varían entre los diferentes elementos de las antenas en la matriz del canal. Esto da lugar a la característica de no estacionariedad en los canales MIMO masivo.

Por otro lado, número masivo de antenas genera matrices de canal de tamaños difícilmente manejables para la estimación en tiempo real del canal MIMO. En este trabajo se propone una transformación y estructuración de las matrices de canal con el objetivo de facilitar su manipulación y almacenaje, a partir de las cuales se realiza un estudio sobre la consistencia espacial de diferentes paneles T-MIMO.

4.4. Consistencia espacial

La consistencia espacial del canal se refiere a la evolución suave y sin discontinuidades del canal cuando las antenas transmisoras y/o receptoras se mueven o se giran. En otras palabras, se relaciona con la estabilidad y uniformidad de la señal o del canal a lo largo de diferentes puntos en el espacio.

Investigaciones han demostrado que los canales en la banda de frecuencias milimétricas son altamente dispersos, con pocas componentes multicamino dominantes en comparación con las bandas de frecuencias más bajas. Esta situación implica que los métodos convencionales de estimación de canal no son aplicables en sistemas MIMO masivos con una alta densidad de obstáculos [25].

El análisis de la consistencia espacial es fundamental para la estimación y modelado del canal, ya que el diseño eficiente de algoritmos para obtener estimaciones precisas requiere considerar esta consistencia.

Para calcular la consistencia espacial, se utilizan modelos y herramientas de trazado de rayos (*ray-tracing*). Estos modelos permiten simular y analizar el comportamiento del canal en escenarios realistas, facilitando el diseño óptimo de sistemas T-MIMO. Además, permiten capturar la variabilidad del canal descomponiéndolo en componentes individuales, como rayos o clusters, cada uno con sus propias características de propagación, lo que facilita la comprensión de los efectos como la dispersión o la atenuación en el canal.

La consistencia espacial abarca múltiples aspectos, incluyendo parámetros de retardos, ángulos de salida (AoD) y ángulos de llegada (AoA), el estado del entorno (interior/exterior), y la presencia de línea de visión directa (LOS) o indirecta (NLOS).

4.5. Trazado de rayos

El trazado de rayos (*raytracing*) es un modelo determinista utilizado para predecir la respuesta del canal de radiocomunicaciones. Este modelo se basa en la Óptica Geométrica (GO) y la Teoría Uniforme de la Difracción (UTD). A medida que aumenta la frecuencia, la primera zona de Fresnel, que concentra la mayor parte de la energía, tiende a estrecharse y puede simularse como un rayo. Así, la propagación de las ondas electromagnéticas se puede seguir de la misma manera que el trayecto de un rayo óptico, simplificando enormemente el análisis [26].

Los mecanismos fundamentales de propagación son la reflexión, la difracción y la difusión. La reflexión ocurre cuando una onda electromagnética incide sobre un objeto cuyas dimensiones son mayores que la longitud de onda. La difracción se produce cuando un rayo es obstruido por una superficie con irregularidades abruptas. Finalmente, la difusión tiene lugar cuando una onda viaja a través de un medio con objetos de dimensiones similares a la longitud de onda, o cuando el número de objetos por unidad de volumen es alto.

Existen dos algoritmos empleados para el trazado de rayos:

- **Teoría de las Imágenes:** Este método se basa en la generación de imágenes (fuentes virtuales) a partir de las posibles reflexiones que pueden producirse en un entorno.
- **Lanzado de rayos (*Ray-Launching*):** Este método considera un haz de rayos transmitidos que pueden o no alcanzar el receptor. El número de rayos considerados y la distancia entre el transmisor y el receptor determinan la resolución espacial disponible y, por ende, la exactitud del modelo. Al trabajar con modelos en 3D, los rayos se lanzan desde el transmisor con un ángulo de elevación (θ) y un ángulo de acimut (ϕ), según el sistema de coordenadas habitual. Este método requiere mayores recursos computacionales en comparación con el método de la teoría de las imágenes.

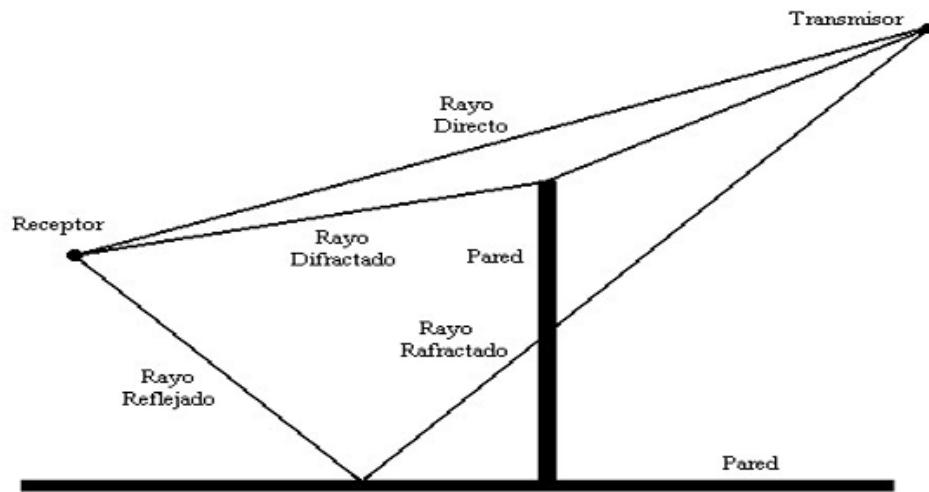


Figura 4.5: Principales efectos físicos de los rayos [26].

La herramienta de trazado de rayos utilizada en este proyecto emplea el algoritmo de lanzamiento de rayos. Dependiendo del escenario considerado y el posicionamiento y distancia de las antenas transmisoras y receptoras, se calcula previamente a la simulación la resolución angular mínima con la que el transmisor ha de realizar el lanzamiento de los rayos para asegurar su impacto en los puntos receptores.

Para la construcción de los escenarios propuestos, se llevaron a cabo medidas experimentales para la caracterización de diferentes materiales que puedan encontrarse en escenarios reales, por ejemplo, madera, metal, ladrillo o vidrio, que pueden tener diversas reflectividades para la onda incidente, lo cual proporciona una mayor exactitud en la predicción del modelo de propagación real.

Capítulo 5

Herramienta de trazado de rayos

El simulador de trazado de rayos utilizado en este proyecto ha sido programado en C y C++, utilizando el motor de juego Unreal Engine, en concreto la versión 5.1. En este simulador se recrea un escenario del interior del edificio de la CPI, en una de las plantas del Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia (iTEAM).

Esta herramienta proporciona una gran facilidad de movimiento a través del escenario y permite seleccionar, mover y girar diferentes objetos del entorno. También permite establecer (tanto por coordenadas como por movimiento manual) el posicionamiento específico de las antenas.

El simulador permite representar paneles matriciales de antenas de cualquier dimensión y tamaño, tanto en transmisión como en recepción. De esta manera, se pueden implementar con facilidad sistemas MIMO masivos en ambos extremos de la comunicación. Además, presenta una pequeña interfaz de configuración previa al comienzo de la simulación. En ella, se pueden especificar varios parámetros tales como la frecuencia deseada, el tamaño de las antenas, el número de reflexiones, transmisión o difracción, así como la posibilidad de que alguno de estos fenómenos no se produzca. Además, si el usuario lo requiere, puede configurar la resolución y apertura angular, tanto en azimut como en elevación, del lanzamiento de rayos.

Una vez comienza la simulación, se realiza el cálculo de todos los rayos que se lanzan desde cada una de las antenas transmisoras. Como se ha comentado anteriormente, para el cálculo de los rayos que sufren reflexión o difracción, se tiene en cuenta el tipo de material sobre el que impactan. Todos los rayos que impacten dentro de los voxels (unidad cúbica de un objeto tridimensional) receptores se considerarán recibidos correctamente, desechando los demás.

Una vez finalizada la simulación, se genera un fichero de datos, en formato csv, que contiene los resultados obtenidos. En concreto, se guarda la información de cada uno de los rayos recibidos por los voxels (antenas receptoras) procedente de cada uno de los transmisores. En la figura 5.1 se muestra un extracto de un fichero csv generado por el simulador con un panel 2x2 en transmisión y 4x4 en recepción.

Capítulo 6

Desarrollo y resultados

En este capítulo se describen, paso a paso, cada una de las etapas desarrolladas a lo largo del proyecto, con el objetivo de caracterizar los diferentes parámetros del canal de comunicación, proponiendo una estructura matricial del canal que facilite su manipulación y almacenaje, optimizando y reduciendo su estimación. Además, se presenta el análisis de la consistencia espacial de diversos paneles MIMO receptores, de dimensiones 4x4, 8x8 y 16x16.

6.1. Entorno de trabajo

Para la realización de este trabajo se ha utilizado el lenguaje de programación Python, debido a su gran compatibilidad con otras plataformas, así como por su capacidad de interoperar y ejecutarse con una gran variedad de aplicaciones y sistemas operativos. Este trabajo se enmarca dentro de un proyecto mayor que pretende explotar las posibilidades del simulador de trazado de rayos desarrollado para diferentes líneas de estudio de las nuevas generaciones de radiocomunicaciones.

Por otro lado, Python cuenta con una gran comunidad de desarrolladores activos, por lo que cuenta con numerosas librerías que agilizan y optimizan el desarrollo de los programadores, manteniendo una sencilla legibilidad y sintaxis.

En concreto, las librerías que se han utilizado en mayor medida para este trabajo son la librería PANDAS, para facilitar el manejo de grandes volúmenes de datos como los que por ejemplo proporciona el fichero csv del simulador, la librería NUMPY, para facilitar todos los cálculos matemáticos y el trabajo con estructuras no existentes en Python como pueden ser los arrays. Finalmente, se hace uso de la librería MATPLOTLIB para la representación gráfica de los resultados.

6.2. Procesamiento de datos

6.2.1. Lectura y almacenamiento de datos

La primera parte del sistema se compone de una primera instanciación de los parámetros principales relativos al sistema MIMO simulado, tales como el número de antenas utilizado, la frecuencia o el ancho de banda. Tras ello, se crea una función de lectura que extrae los datos en bruto del fichero

de datos generado por el simulador. De este modo, la información de cada uno de los diferentes rayos queda almacenada en una clase donde cada instancia corresponde con cada uno de los voxels (antenas) receptores.

A raíz de los parámetros proporcionados en el fichero de datos original, se puede estimar y añadir a cada rayo información relevante adicional, tal y como su retardo, su fase o las pérdidas totales sufridas. Además, por cada reflexión que sufre el rayo se aplica un desfase de π radianes.

$$Retardo = \frac{Distancia}{c} \quad (6.1)$$

$$Fase = \frac{2 \cdot \pi \cdot Distancia}{\lambda} \quad (6.2)$$

$$Pérdidas\ totales = Pérdidas\ materiales + Pérdidas\ espacio\ libre \quad (6.3)$$

Mencionar que para este trabajo se ha asumido que tanto las antenas transmisoras como las receptoras presentan una ganancia de 0 dBi. En caso de que el usuario requiera simular un modelo de antena real específico, se ha habilitado la posibilidad de establecer las especificaciones referentes a dicho modelo, en términos de ganancia.

6.2.2. Filtrado en potencia

En los entornos de comunicaciones móviles, especialmente en los sistemas MIMO, la existencia de múltiples rayos y trayectorias pueden introducir interferencias significativas en la señal recibida, especialmente aquellos que presenten una potencia mucho menor respecto al rayo principal. Al filtrar los rayos con pérdidas muy elevadas (por ejemplo, más de 20 dB), se pueden eliminar aquellos que contribuyen poco a la señal recibida y que, en cambio, pueden aumentar la interferencia y degradar la calidad de la señal.

Al eliminar los rayos con pérdidas altas y reducirse así la posibilidad de interferencia, aumenta a su vez la proporción de energía que realmente contribuye a la información útil recibida, lo que se traduce en una mejora de la eficiencia espectral, es decir, en una mejora de la cantidad de información que se puede transmitir por unidad de ancho de banda, aumentando así el rendimiento del sistema.

El umbral de 20 dB se ha establecido como un valor comúnmente utilizado en comunicaciones móviles debido a varias razones. La primera es que es un umbral suficientemente alto como para eliminar los rayos con pérdidas significativas que pueden introducir interferencia, pero no tan alto como para eliminar rayos que aún puedan contribuir a la señal recibida. La segunda razón es que la relación señal-ruido (SNR) típicamente requerida para una buena calidad de la señal en sistemas móviles es de aproximadamente 10 a 20 dB. Por ello, un umbral de 20 dB proporciona un margen adecuado para filtrar los rayos con pérdidas significativas sin afectar negativamente la calidad de la señal.

6.2.3. Cancelación de rayos duplicados

A pesar de que mediante simulación los rayos se consideren infinitamente estrechos y con una resolución temporal infinita, en un sistema de comunicaciones real, el panel MIMO tiene un ancho de banda y ancho de haz limitado.

El ancho de banda se refiere a la cantidad de frecuencias que el sistema puede utilizar para transmitir datos. La capacidad de que la antena receptora distinga diferentes rayos depende de su ancho de banda. Un ancho de banda más amplio significa que la antena puede recibir señales que están más cerca en el dominio de la frecuencia sin interferencia mutua. Cuando se recibe una señal, esta puede estar compuesta de múltiples componentes de frecuencia. Cada una de estas componentes puede tener un cierto retraso temporal debido a las diferentes trayectorias que recorre la señal antes de llegar al receptor. La capacidad de la antena receptora de distinguir entre dos rayos depende de cuánto se superponen en el dominio de la frecuencia. Si los retardos de los dos rayos están dentro de intervalos de tiempo iguales al inverso del ancho de banda, significa que las componentes de frecuencia están lo suficientemente separadas en el dominio de la frecuencia para que la antena pueda distinguirlos.

Por otro lado, el ancho de haz de una antena se refiere al rango angular dentro del cual la antena puede recibir señales con una ganancia aceptable. Si los ángulos de dos rayos están dentro del mismo ancho de haz, la antena no puede distinguirlos porque ambos llegarán desde direcciones muy similares, por lo tanto, los considerará como un solo rayo.

Con esto, se ha implementado una cancelación de rayos cuando dos o más rayos se consideran idénticos. Las condiciones de considerar o no idénticos dos rayos, son, además de las ya mencionadas, las referentes al fenómeno físico sufrido, a los materiales con los que se interacciona, y a la antena que los transmita. En otras palabras, dos rayos serán considerados el mismo por parte de la antena receptora cuando sus retardos estén dentro del intervalo de tiempo igual al inverso del ancho de banda, cuando sus ángulos, tanto de salida como de llegada en azimut y en elevación caigan dentro de la “zona de captura” de la antena, cuando hayan sufrido el mismo fenómeno físico, cuando hayan interactuado con los mismos materiales y provengan de la misma antena transmisora.

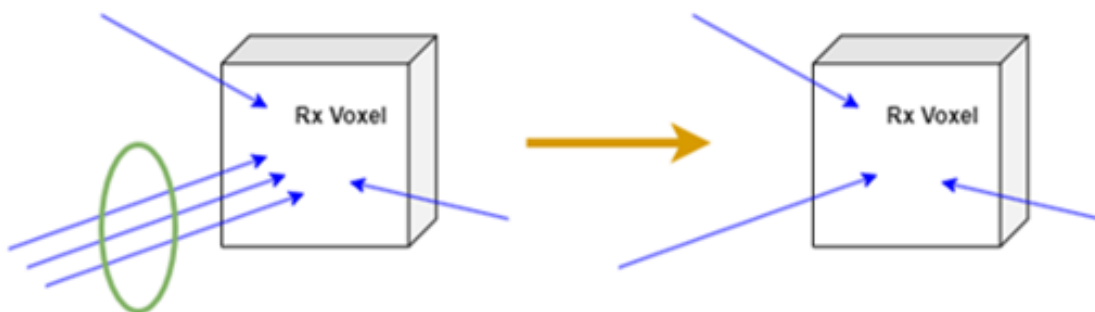


Figura 6.1: Cancelación de rayos duplicados.

6.2.4. Transformación de la matriz de canal

Una vez que los voxels han sido correctamente filtrados y contienen solo los rayos relevantes, es el momento de generar la matriz de canal. Se propone una estructuración matricial tal y como se muestra en las imágenes siguientes, para un panel 4x4 en transmisión y 4x4 en recepción. Cada elemento de la matriz contiene un vector con la información de todos los rayos recibidos por cada una de las antenas del panel receptor, desde un solo transmisor, de manera independiente.

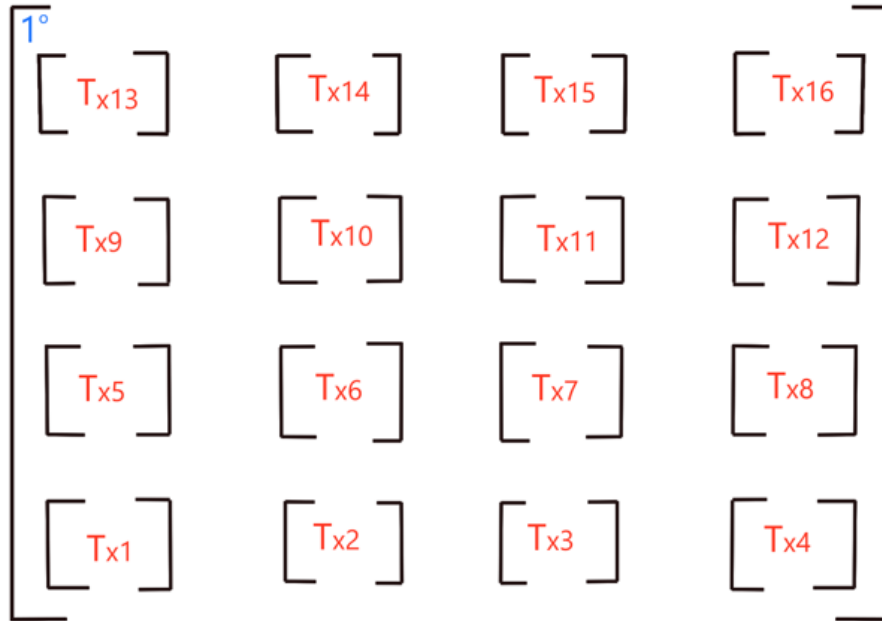


Figura 6.2: Estructura de la matriz de canal.

Así como el tamaño de la matriz convencional sería, en este ejemplo, de 16x16 (256 elementos), de esta forma la dimensión de la matriz de canal queda definida por la dimensión del panel transmisor, independientemente del número de antenas que haya en recepción, habiendo 'encapsulado' la información recibida y discriminando por antena transmisora.

Además, se evita perder información sobre los distintos parámetros de cada uno de los rayos (Ángulos de salida, Ángulos de llegada, Retardo, Módulo, Fase).

De este modo, toda la información y datos en bruto queda estructurada de una manera compacta, de menor dimensión y de fácil manipulación.

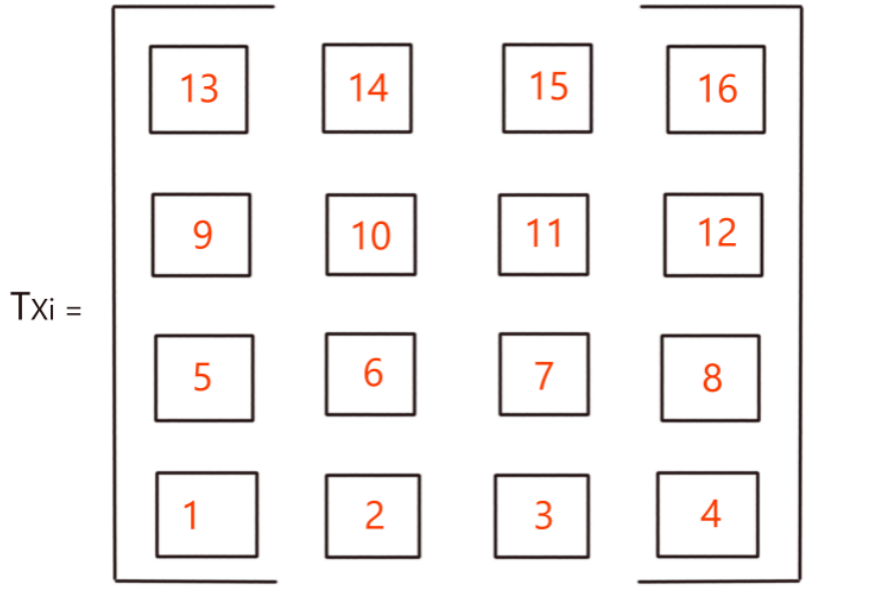


Figura 6.3: Estructura de un elemento (submatriz) de la matriz canal.

$$h_{ij} = \begin{bmatrix} [AoA, AoD, Retardo, Modulo, Fase]^{(1)} \\ [AoA, AoD, Retardo, Modulo, Fase]^{(2)} \\ \dots \\ \dots \\ [AoA, AoD, Retardo, Modulo, Fase]^{(n)} \end{bmatrix} \quad (6.4)$$

6.2.5. Agrupamiento de rayos

Debido a que el volumen de información contenida en cada uno de los voxels puede llegar a ser demasiado elevado, incluso después de haber eliminado los rayos duplicados, se va a optimizar realizando agrupaciones de rayos en volúmenes por ángulos. Con ello se pretende simplificar la extracción de la información de canal, ayudar a identificar patrones y estructuras en los datos, y en definitiva, ayudar a modelar el canal de comunicación de manera más eficiente, utilizando los grupos para representar las características generales del canal, como la ganancia o las direcciones de salida y de llegada.

El sistema de agrupación por ángulos se ha realizado en función de los ángulos de salida y los ángulos de llegada. El criterio de agrupación consiste en agrupar aquellos rayos que no difieran más de un umbral angular específico, tanto en transmisión como en recepción, en azimut y en elevación.

Este tipo de agrupación nos permite identificar las direcciones angulares, tanto de salida como de llegada, que presentan contribuciones en el sistema, así como aquellas que contienen mayores niveles de potencia. Una vez identificados los diferentes grupos, se suman en potencia cada uno de los rayos, quedando finalmente una única contribución por grupo.

De acuerdo con recientes estudios, el número de grupos (*clusters*) es una constante en la banda de microondas. En cambio, para la banda de milimétricas, dicha asunción no resulta razonable, debido

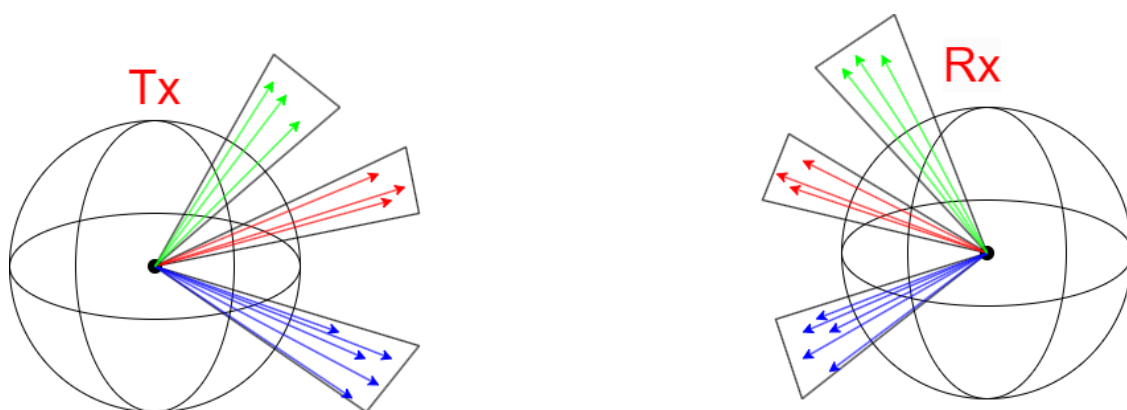


Figura 6.4: Agrupamiento de rayos por ancho de haz.

a que el canal es disperso tanto en el dominio temporal como en el dominio espacial. La literatura reciente muestra que el número de *clusters* es reducido, variando en función de la definición o criterio de agrupamiento que se haya establecido. En estudios como [27] sólo se encuentran hasta cinco lóbulos espaciales en entornos densos sin línea de visión (NLOS).



Figura 6.5: Principales contribuciones del sistema.

De este modo, se obtiene un conjunto reducido de contribuciones significativas en términos de ángulos de salida y ángulos de llegada. En este trabajo se ha realizado el análisis de la consistencia espacial a partir de las tres contribuciones principales con mayor potencia del sistema.

6.2.6. Análisis de la consistencia espacial

Estudios como [28] muestran como el canal puede cambiar significativamente a lo largo de un array lineal de gran escala, en comparación con los canales MIMO tradicionales. Las grandes dimensiones físicas del array conducen a posibles cambios de potencia de las diferentes componentes multicamino (MPCs) o incluso a la aparición de alguna componente independiente en alguna de las antenas. Esto se traduce en que no todos los obstáculos son visibles por todas las antenas del array, e incluso de serlo, las contribuciones pueden variar considerablemente.

En este trabajo se pretende evaluar como la variación del ancho de haz afecta a la capacidad de agrupamiento de los rayos. En concreto, dichos agrupamientos e identificación de las principales contribuciones serán analizados para comprender la variabilidad espacial existente a lo largo de las diferentes antenas en paneles MIMO. Para ello, se ha simulado el mismo entorno para diferentes paneles de antenas receptoras y un mismo panel transmisor, de dimensión 4x4. En concreto, se han analizado paneles receptores de dimensiones 4x4, 8x8 y 16x16.

En las siguientes imágenes se muestra el escenario simulado. Como puede apreciarse, la disposición de la habitación y el posicionamiento de las antenas resulta en un entorno altamente dispersivo, en el que no existe línea de visión directa. Las simulaciones fueron realizadas a 10 GHz de frecuencia, con una separación entre las antenas del panel de $\lambda/2$, una distancia transmisor-receptor de 6 metros y una altura de ambas antenas de 1.5 metros.



Figura 6.6: Escenario simulado.



Figura 6.7: Escenario simulado, vista desde el transmisor.

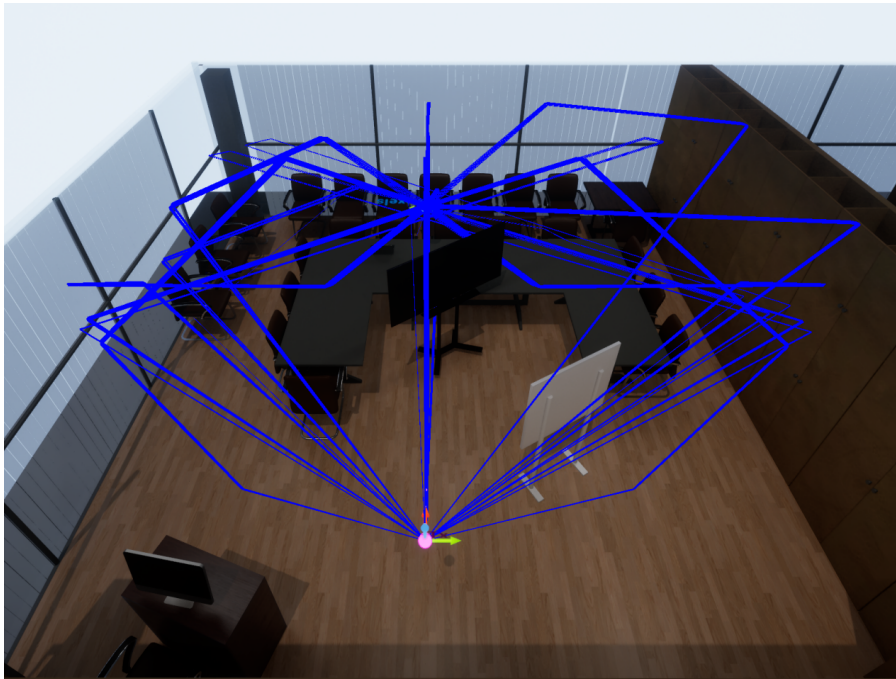


Figura 6.8: Visualización de los rayos simulados.

Para cada una de las antenas receptoras se han estimado las principales contribuciones, de manera independiente, para anchos de haz de 1° , 2° y 5° . En caso de que una antena reciba las mismas contribuciones que otra del resto de antenas del panel, se puede decir que dichas antenas 'ven' el mismo canal. En otras palabras, el canal no cambia bruscamente entre ellas, por lo que existe consistencia espacial entre ellas.

En la figura 6.9 se muestran los resultados obtenidos correspondientes al panel receptor de dimensión 4×4 . Aquellos voxels representados del mismo color corresponden a aquellas antenas que reciben contribuciones desde las mismas direcciones tanto de salida como de llegada, tanto en azimut como en elevación. Este panel, el de menor tamaño de los analizados en este trabajo, presenta pequeñas variaciones a lo largo de su conjunto de antenas, en comparación con el resto de paneles,

como se aprecia en las figuras 6.10 y 6.11.

Se observa como, a medida que aumenta la separación angular mínima que han de tener los rayos para que el receptor los pueda discriminar, disminuye el número de grupos o zonas del panel que perciben el canal de manera independiente a otras, hasta el punto de no existir variación espacial ninguna, como se aprecia en el caso de una resolución angular de 5° . Esto significa que un ancho de haz reducido resulta crítico a la hora de identificar caminos espaciales independientes, identificación de gran valor en aplicaciones como localización o explotación de la diversidad espacial.

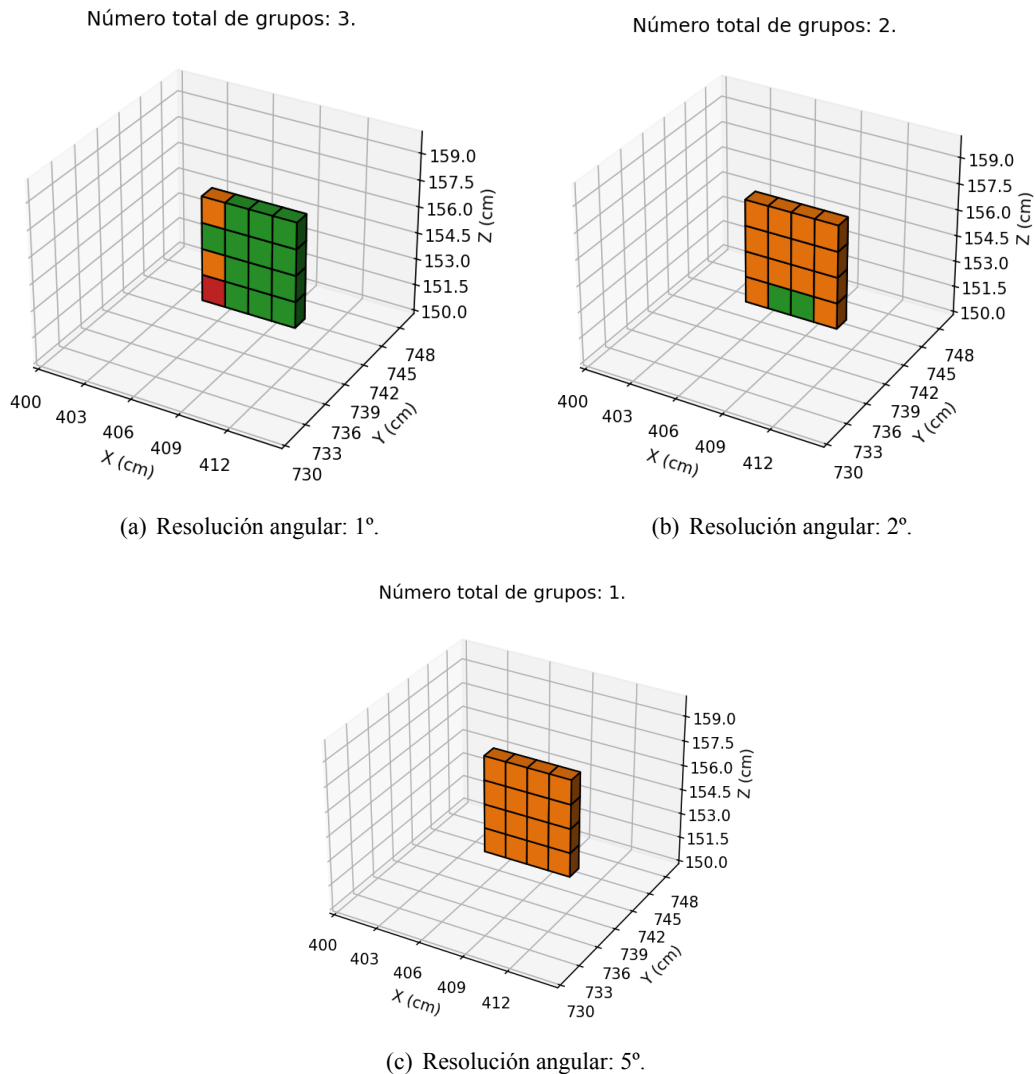


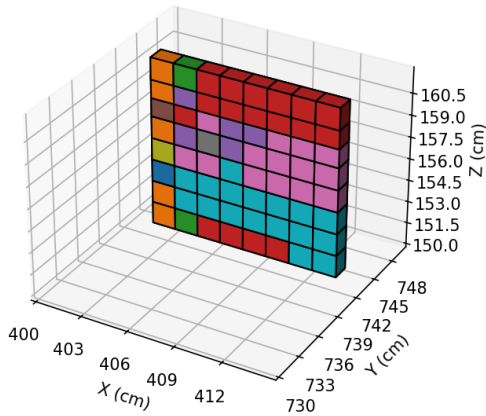
Figura 6.9: Panel MIMO 4x4.

Del mismo modo, en la siguiente figura se muestran los resultados del resto de simulaciones y paneles. Al igual que para el panel 4x4, a medida que la resolución angular disminuye (aumento del ancho de haz), el número total de agrupaciones distintas se reduce.

Además, se observa claramente como, a medida que las dimensiones físicas del panel aumentan, lo hace también la variabilidad del mismo, generándose un mayor número de zonas independientes,

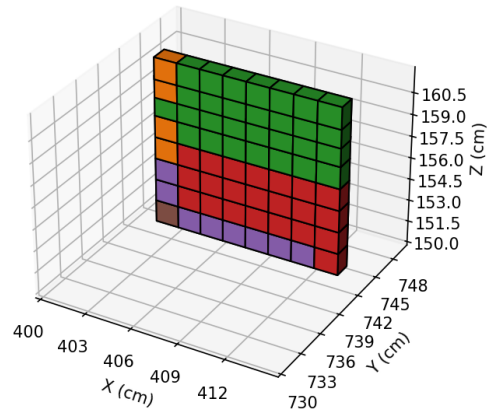
tal y como puede apreciarse por ejemplo en los 6 grupos que presenta el panel 16x16 con resolución angular de 5° , frente al único grupo existente en el correspondiente panel de dimensión 4x4. Esto se asimila con estudios como [25], los cuales indican que las regiones espacialmente estacionarias en la banda de milimétricas (menos de 0.09 m) son significativamente más pequeñas que aquellas en la banda de UHF/microondas (alrededor de 0.6 m).

Número total de grupos: 13.



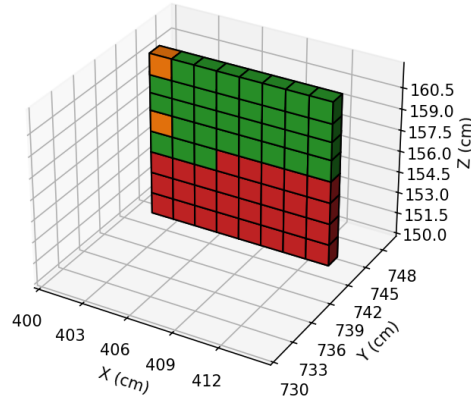
(a) Resolución angular: 1° .

Número total de grupos: 5.



(b) Resolución angular: 2° .

Número total de grupos: 3.



(c) Resolución angular: 5° .

Figura 6.10: Panel MIMO 8x8.

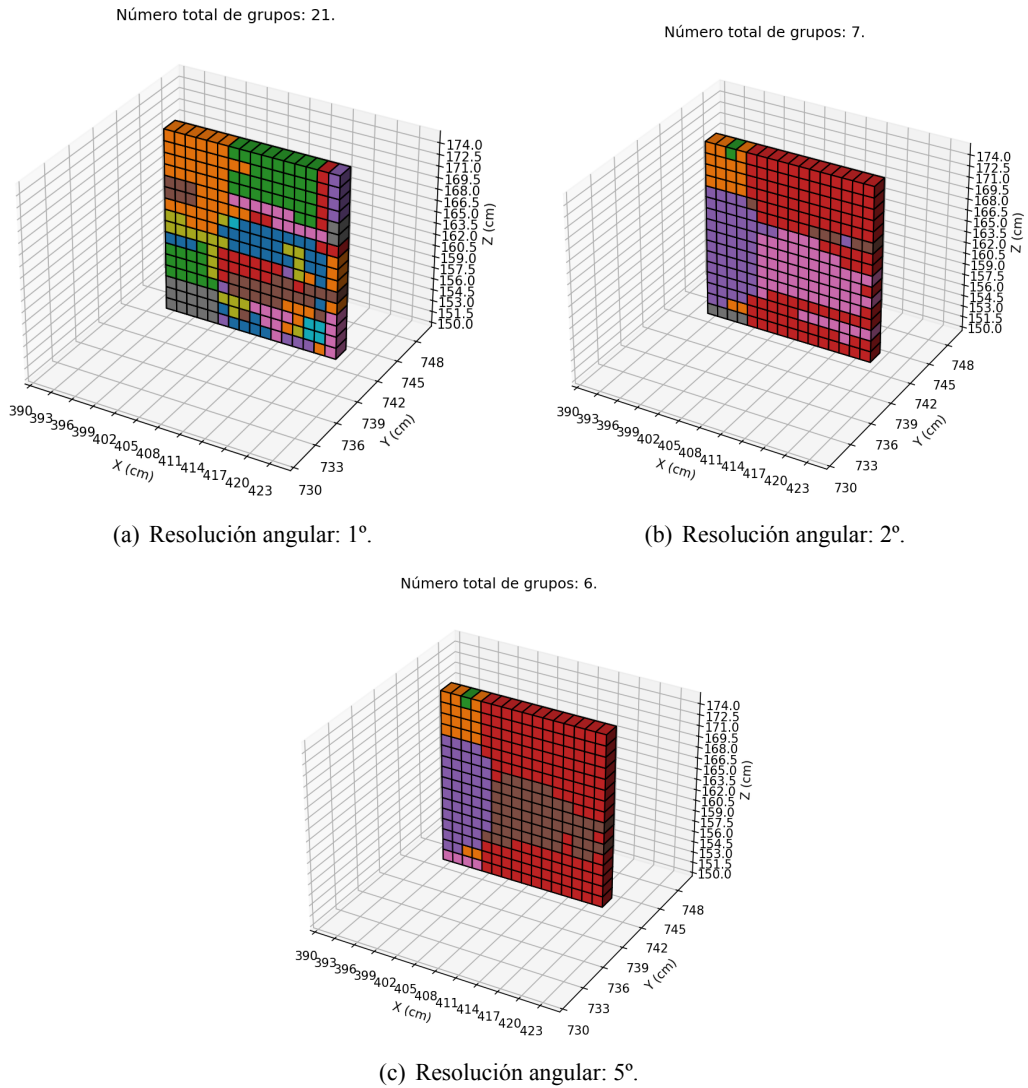


Figura 6.11: Panel MIMO 8x8.

Dada la separación de $\lambda/2$ entre las antenas de los paneles simulados, se puede comprobar como en efecto, en el panel 4x4 (distancia máxima entre antenas de 0.06 metros) existe una mayor concentración de zonas uniformes. Los paneles 8x8 y 16x16 (0.12 metros y 0.24 metros respectivamente) comienzan a presentar un mayor aumento de regiones no estacionarias a lo largo del array. No obstante, no se debe olvidar que la disposición tanto de las antenas como del entorno puede influir en la consistencia y en las distancias de correlación. Además, estos resultados indican que para la estimación de canal en la banda de milimétricas se ha de tener en cuenta el cambio mínimo de distancia a lo largo del entorno.

Capítulo 7

Conclusiones y líneas futuras

Este trabajo ha abordado los desafíos asociados con el uso de un número masivo de antenas en sistemas de comunicaciones inalámbricas de nueva generación, los denominados sistemas MIMO masivos (T-MIMO), específicamente en el contexto de la tecnología 6G y de la banda de frecuencias de ondas milimétricas. A través de la utilización de herramientas de simulación 3D de alta precisión, se han generado, analizado y transformado matrices de canal con el objetivo de facilitar su manipulación y almacenamiento. Este análisis ha permitido estudiar características cruciales del canal T-MIMO, como la consistencia espacial.

En concreto, se ha realizado un procesamiento y una reestructuración de datos masivos procedentes del sistema simulado, para posteriormente desarrollar un sistema de cálculo y agrupamiento de las contribuciones y direcciones principales del sistema. Con ello, se ha realizado el análisis de la consistencia espacial a lo largo de paneles MIMO de dimensiones 4x4, 8x8 y 16x16, con una separación entre antenas de $\lambda/2$, a la frecuencia de trabajo de 10 GHz .

Los resultados obtenidos revelan varias observaciones importantes. Los paneles de menor tamaño, como el de 4x4, presentan menores variaciones espaciales en comparación con los de dimensiones mayores. Este fenómeno sugiere que las antenas ubicadas más cercanas entre sí reciben contribuciones de señal más similares debido a la menor diferencia en las trayectorias de propagación de las ondas, por lo que, en paneles pequeños, la proximidad entre antenas maximiza dicha coherencia espacial. No obstante, la disposición de las antenas y la existencia de diferentes obstáculos puede afectar significativamente a la consistencia. Las bandas de frecuencia elevadas, como las utilizadas en este tipo de sistemas, y entornos ricos en multitrayecto, hacen que las señales experimenten reflexiones, difracciones y dispersión, afectando a la consistencia. Este hecho se relaciona también con que la probabilidad de que las señales recibidas por parte de las diferentes (y más distantes) antenas de los paneles grandes provengan de trayectorias de propagación más variadas aumente.

Por otro lado, se ha demostrado como una resolución angular elevada es esencial para aumentar la precisión a la hora de identificar caminos espaciales independientes, cruciales para la explotación de la diversidad espacial en sistemas MIMO.

Este trabajo ha revelado varias áreas prometedoras para la investigación futura en el campo de los sistemas MIMO masivos. Una dirección importante reside en las técnicas de localización y seguimiento de caminos espaciales independientes a tiempo real, integrándolas con sistemas de navegación avanzados en aplicaciones como vehículos o robótica. Además, se debe extender el análisis a nuevas configuraciones y espaciamientos entre antenas para entender mejor como múl-

tiples obstáculos y movimiento afecta a la propagación de las señales.

Otra área de estudio reside exploración de nuevas bandas de frecuencia, como las bandas sub-terahercios. Analizar el comportamiento de la consistencia espacial en estas bandas aún por explotar contribuirá a ajustar los modelos de canal para reflejar las características únicas de propagación y desarrollar tecnologías más avanzadas y eficientes.

Todo ello, junto con el reciente crecimiento actual de la inteligencia artificial, puede mejorar drásticamente la precisión y eficiencia en la estimación de canal, abordando los desafíos de complejidad y velocidad de procesamiento, dando un paso al frente a la adquisición de las tecnologías emergentes de sexta generación.

Bibliografía

- [1] “Internet móvil: accesos a redes 2G, 3G, 4G y 5G en el mundo | Statista — es.statista.com”. En: (2024).
- [2] Noelia Fragueta. “El número de usuarios de internet en el mundo crece un 1,8 % y alcanza los 5.350 millones (2024) — marketing4ecommerce.net”. En: (2024).
- [3] Pablo Alonso González et al. “Caracterización del Canal MIMO Masivo en Interiores Mediante Trazado de Rayos para Comunicaciones 5G”. En: (2020).
- [4] Junjuan Feng et al. “Two-way massive MIMO relaying systems with non-ideal transceivers: Joint power and hardware scaling”. En: *IEEE Transactions on Communications* 67.12 (2019), págs. 8273-8289.
- [5] Xiang Gao, Fredrik Tufvesson y Ove Edfors. “Massive MIMO channels—Measurements and models”. En: *2013 Asilomar conference on signals, systems and computers*. IEEE. 2013, págs. 280-284.
- [6] Felipe Augusto Pereira de Figueiredo. “An Overview of Massive MIMO for 5G and 6G”. En: *IEEE Latin America Transactions* 20.6 (2022), págs. 931-940.
- [7] Víctor Manuel Pittaluga Pérez. “Caracterización de canales radio holográficos (Holographic Radio Space) para comunicaciones móviles de siguiente generación”. En: (2023).
- [8] ITU RECOMMENDATION. *Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2030 and beyond*. Inf. téc. tech. rep., International Telecommunication Union (ITU) Recommendation (ITU-R), 2023.
- [9] Harish Viswanathan y Preben E Mogensen. “Communications in the 6G era”. En: *IEEE access* 8 (2020), págs. 57063-57074.
- [10] Juanma Rojas. *Cuándo llegará el 6G y qué avances supone— telefonica.com*. <https://www.telefonica.com/es/sala-comunicacion/noticias/cuando-llegara-el-6g-y-que-avances-supone/>. 2023.
- [11] Francisco Javier Cepeda Cabeza. “Técnicas avanzadas de comunicaciones radio para 5G con MIMO masivo”. B.S. thesis. 2018.
- [12] Oscar Espinosa. *Qué es el espectro radioeléctrico y en qué me afecta — redeszone.net*. <https://www.redeszone.net/reportajes/tecnologias/que-es-espectro-radioelectrico/>. 2024.

- [13] Gobierno De España Ministerio Para La Transformación Digital Y De La Función Pública. *S.E. de Digitalización e Inteligencia Artificial y S.E. de Telecomunicaciones e Infraestructuras Digitales - Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias — avancedigital.mineco.gob.es*. <https://avancedigital.mineco.gob.es/espectro/Paginas/cnaf.aspx>.
- [14] Olof Liberg Daniel Chen Larsson Stefan Parkvall. *6G standardization timeline and principles—ericsson.com*. <https://www.ericsson.com/en/blog/2024/3/6g-standardization-timeline-and-technology-principles..> 2024.
- [15] 3GPP. *Release 20—3gpp.org*. <https://www.3gpp.org/specifications-technologies/releases/release-20>. 2024.
- [16] Generación IoT. *El tamaño del mercado mundial del IoT crecerá un 19% en 2023: El IoT resiste a pesar de la recesión económica — internetdelas cosas.xyz*. <https://internetdelas cosas.xyz/articulo.php?id=2220>. 2023.
- [17] Europa Press PortalTIC. *El Internet de las Cosas (IoT) podría generar un valor global de entre 5,5 y 12,6 billones de dólares hasta 2030 — europapress.es*. <https://www.europapress.es/portaltic/empresas/noticia-internet-cosas-iot-podria-generar-valor-global-55-126-billones-dolares-2030-20220127111029.html>. 2022.
- [18] luciaclemares. *Los dispositivos IoT y su impacto en la sostenibilidad — telefonica.com*. <https://www.telefonica.com/es/sala-comunicacion/blog/los-dispositivos-iot-y-su-impacto-en-la-sostenibilidad/>.
- [19] Castillo-Soria Francisco Rubén et al. “La modulación espacial, una comparación de las técnicas básicas de transmisión”. En: *Ingeniería, investigación y tecnología* 17.2 (2016), págs. 273-282.
- [20] Alberto Banos Cerezo et al. “Análisis del canal MIMO masivo en interiores para su aplicación en 5G”. En: (2020).
- [21] Ashish Kumar Sarangi y Amlan Datta. “Capacity comparison of siso, simo, miso and mimo systems”. En: (2018), págs. 798-801.
- [22] JJ Anguís Horno. “Redes de Área Local Inalámbricas: Diseño de la WLAN de Wheelers Lane Technology College”. En: *Escuela Superior de Ingenieros Universidad de Sevilla: Dpto. de Teoría de la Señal y Comunicaciones* (2008).
- [23] Oscar Fernández Fernández et al. *Caracterización Experimental y Modelado de Canal MIMO para aplicaciones WLAN y WMAN*. Universidad de Cantabria, 2008.
- [24] Guefry Leider Agredo-Méndez, Pablo Emilio Jojoa-Gómez y Vicenç Almenar-Terré. “Sistemas MIMO con un elevado número de antenas: clave para la 5G inalámbrica”. En: *Entramado* 11.2 (2015), págs. 250-261.
- [25] Shu Sun et al. “Propagation models and performance evaluation for 5G millimeter-wave bands”. En: *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 67.9 (2018), págs. 8422-8439.
- [26] José Luis Camargo Olivares. “Modelo de cobertura para redes inalámbricas de interiores”. En: ().
- [27] Mathew K Samimi y Theodore S Rappaport. “3-D millimeter-wave statistical channel model for 5G wireless system design”. En: *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 64.7 (2016), págs. 2207-2225.

-
- [28] Qi Wang et al. “Spatial variation analysis for measured indoor massive MIMO channels”.
En: *IEEE Access* 5 (2017), págs. 20828-20840.