ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Grado

Caracterización en banda ancha del canal MIMO Masivo en 5G en una picocelda de exterior

(Broadband Characterization of the Massive MIMO Channel in 5G for an Outdoor Picocell)

Para acceder al Título de

Graduado en

Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicación

Autor: Oscar Fernandez Gutierrez.

Septiembre - 2024



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

GRADUADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS DE TELECOMUNICACIÓN CALIFICACIÓN DEL TRABAJO FIN DE GRADO

Realizado por: Oscar Fernández Gutiérrez

Directores del TFG: Jesús Ramón Pérez López y Rafael Pedro Torres Jiménez.

Título: "Caracterización en banda ancha del canal MIMO Masivo en 5G en una picocelda de exterior".

Title: "Broadband Characterization of the Massive MIMO Channel in 5G for an Outdoor Picocell".

Presentado a examen el día: 19 de septiembre de 2024

para acceder al Título de

GRADUADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS DE TELECOMUNICACIÓN

Composición del Tribunal:

Presidente (Apellidos, Nombre): JOSE LUIS CRESPO FIDALGO Secretario (Apellidos, Nombre): JOSE ANGEL GARCÍA GARCÍA Vocal (Apellidos, Nombre): MARTA DOMINGO GRACIA

Este Tribunal ha resuelto otorgar la calificación de:

Fdo.: El Presidente

Fdo.: El Secretario

Fdo.: El Vocal

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

V^o B^o del Subdirector

Trabajo Fin de Grado Nº (a asignar por Secretaría)

Agradecimientos

A mi familia por ayudarme en todo lo posible y a los compañeros y amigos por los buenos momentos a su lado.

A Jesús R. Pérez y Rafael P. Torres por su ayuda y dedicación.

RESUMEN

En este trabajo se presenta un análisis y caracterización de un canal con múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO) en una picocelda de exterior con un número alto de usuarios y una estación base que consiste en un array virtual con más de cien elementos. Este análisis está basado en los resultados de una campaña de medidas que se llevó a cabo en la banda de frecuencias de 6.425-7.125GHz en un escenario donde no se pueden controlar los efectos adversos del entorno. Como ya se sabe, el rendimiento del sistema MIMO depende mucho de que el entorno sea favorable. Esto depende de muchos factores, uno de los más importantes es la distribución espacial de los usuarios. En orden de evaluar el rendimiento del canal MIMO masivo se realizará un estudio estadístico de varios usuarios, y se estudiarán los perfiles potencia retardo, el retardo cuadrático medio y el ancho de banda de coherencia.

ABSTRACT

In this work, an analysis of the massive multiple input and multiple output (MIMO) channel is presented, considering an outdoor picocell with a high number of active user terminals and a base station consisting of a virtual array with up to one hundred elements. The analysis is based on the results of a measurement campaign carried out in the 6.425 to 7.125 GHz band in a scenario where the adverse effects of the environment cannot be controlled. As is already known, the performance of the MIMO system depends greatly on whether the environment is favorable. This depends on many factors, one of the most important is the spatial distribution of users. In order to evaluate the performance of the massive MIMO channel, a statistical study of several users will be carried out, and the power delay profiles, the mean square delay and the coherence bandwidth will be studied.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	10
1.1. Contexto	10
1.2. Evolución de las comunicaciones móviles	11
1.3. Objetivos	16
1.4. Estructura del documento	16
CAPÍTULO 2: CARACTERIZACIÓN DEL CANAL RADIO	17
2.1. MIMO Masivo	17
2.2. Canal radio	21
2.2.1. Caracterización del canal radio	21
2.2.1.1. Caracterización en banda ancha del canal	22
CAPÍTULO 3: SONDA DE MEDIDA DEL CANAL RADIO	26
3.1. Introducción	26
3.2. Sonda de medida	27
3.3. Soportes de antena y conmutador	35
CAPÍTULO 4: RESULTADOS	40
4.1. Descripción del entorno de medida	40
4.2. Resultados	41
4.2.1. Perfil potencia retardo	43
4.2.2. RMS Delay Spread	47
4.2.3. Ancho de banda de coherencia	48
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES	50
5.1. Conclusiones	50
5.2. Líneas futuras	51

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Evolución anual del número de operadores (MNO) con despliegues de redes 4G.

Figura 1.2. Países sin redes móviles 4G.

Figura 1.3. Requisitos del IMT-2020 para los sistemas 5G.

Figura 1.4. % acceso a redes 5G en 2021

Figura 2.1. Ejemplo de sistema MIMO MxN en enlace ascendente.

Figura 2.2. Comportamiento de los modelos frente a 100 antenas y un número de usuarios variable.

Figura 2.3. Eficiencia espectral de los modelos para un número de antenas variable.

Figura 3.1 Regiones WRC-23.

Figura 3.2 VNA P5006A de Keysight Technologies.

Figura 3.3. Esquemático de la sonda de canal: (a) Sonda de canal física; (b) Diagrama de bloques de la sonda de canal.

Figura 3.4 Antena tipo bocina.

Figura 3.5 Antena omnidireccional.

Figura 3.6 Equipo óptico a implementar.

Figura 3.7 Antena parche 2x2, (a) Antena física, (b) Antena medidas radioeléctricas.

Figura 3.8. Perdidas inserción antena 2x2.

Figura 3.9. Array virtual

Figura 3.10. Ventana de configuración VNA P5006A

Figura 3.11. Ventana de configuración VNA P5006A

Figura 3.12. Boceto inicial del soporte de antena y cables.

Figura 3.13. Soporte para agrupación de antena 2x2 en la banda de 3.6 GHz. (a) Diseño. (b) Soporte fabricado.

Figura 3.14. Soporte para agrupación de antena 2x2 en la banda de 6.7 GHz. (a) Diseño. (b) Soporte fabricado.

Figura 3.15. Soporte para agrupación de antena 2x2 en la banda de 26 GHz. (a) Diseño. (b) Soporte fabricado.

Figura 3.16. Soporte para conmutador de RF. (a) Diseño soporte conmutador. (b) Abrazadera inferior. (c) Abrazadera superior. (d) Diseño fabricado.

Figura 3.17. Montaje de los soportes y antena.

Figura 4.1. Posicionamiento de los diferentes transmisores.

Figura 4.2. Interfaz principal del software para el análisis del canal.

Figura 4.3. Interfaz análisis de los PDP.

Figura 4.4. PDPs del transmisor 1.

Figura 4.5 PDPs a) PDP del transmisor 1, (b) PDP del transmisor 2, (c) PDP del transmisor 3, (d) PDP del transmisor 4, (e) PDP del transmisor 5, (f) PDP del transmisor 6.

Figura 4.6 PDPs a) PDP del transmisor 7, (b) PDP del transmisor 8, (c) PDP del transmisor 9, (d) PDP del transmisor 10, (e) PDP del transmisor 11, (f) PDP del transmisor 12.

Figura 4.7 PDP del transmisor 13.

Figura 4.8. Resultados del RMS Delay Spread en función de la distancia.

Figura 4.9. Resultados del RMS Delay Spread en función de la distancia en entornos interiores.

Figura 4.10. Anchos de banda para los diferentes transmisores a) Transmisor 3, (b) Transmisor 4, (c) Transmisor 6, (d) Transmisor 8.

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Tabla comparativa de los diferentes sistemas.

Tabla 3.1. Características del equipo de RF-Óptico.

Tabla 3.2. Valores para la configuración de las medidas.

Tabla 4.1. Posición de transmisores y distancia entre transmisor y centro del array receptor. Nota: se utiliza como origen de coordenadas la posición del escáner

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. Contexto

La evolución de la sociedad es un proceso continuo y complejo, impulsado por un avance constante en diversos sectores que forman la base del progreso. Entre estos pilares destaca el avance tecnológico, que actúa como el principal motor en la búsqueda de nuevos conocimientos y herramientas en beneficio de la humanidad. La tecnología, particularmente en el campo de las comunicaciones, ha sido clave en las últimas décadas. Su impacto ha dado lugar a numerosas innovaciones en la forma en que interactuamos, distribuimos información y accedemos a servicios. Su influencia ha sido tan profunda que resulta difícil imaginar la vida sin ella, un hecho respaldado por actualizaciones cada vez más rápidas y significativas, aplicables a múltiples formatos.

Para continuar con el progreso, es necesario, entre otros factores, incrementar la capacidad de tráfico de datos y reducir la latencia en las redes, superando las limitaciones de las tecnologías actuales. La introducción de los sistemas 5G (quinta generación redes móviles) marca un paso hacia la oferta de servicios de alta calidad, adaptándose a las nuevas exigencias de uso. Para enfrentar estos nuevos escenarios, es esencial definir los requisitos operativos de los sistemas, lo que plantea importantes desafíos tecnológicos, como el estudio del canal radio.

La caracterización del canal radio en las distintas bandas de frecuencia asignadas a las comunicaciones móviles terrestres en el marco del Plan Nacional sobre 5G, abre una prometedora línea de investigación, de la que este Trabajo Fin de Grado (TFG) forma parte. Al considerar la capa física de estos sistemas y basarse en OFDMA (orthogonal frequency-division multiple access), es posible emplear diversos parámetros de banda ancha para analizar el comportamiento del canal, así como utilizar modelos para evaluar su capacidad y eficiencia espectral. Este trabajo se centra en la caracterización experimental del canal radio en entornos exteriores. Para ello, se utilizará una sonda de medida del canal radio en el dominio de la frecuencia que habrá que mejorar para poder utilizarla con garantías en entornos de exterior. Contribuir a mejorar y aumentar el knowhow sobre el canal de propagación es un aspecto crucial para que la comunidad científica pueda colaborar en el desarrollo y despliegue de los sistemas 5G actuales y de las redes futuras de sexta generación.

1.2. Evolución de las comunicaciones móviles

La evolución de las comunicaciones móviles ha sido un proceso transformador y continuo que ha cambiado radicalmente la forma en que nos comunicamos, trabajamos y accedemos a la información. Esta evolución comienza con la primera generación de tecnología móvil, conocida como 1G, que apareció en los años 80. La tecnología 1G utilizaba exclusivamente sistemas analógicos, lo que producía diferentes limitaciones, como son una calidad de sonido baja, seguridad limitada y una capacidad reducida para soportar conexiones simultáneas.

Los despliegues de las redes 1G nacen con la incorporación del sistema AMPS (Advanced Mobile Phone System) en USA, dotado con 666 canales dúplex en la banda de 800MHz, y casi en paralelo en Europa con la incorporación de la variante europea, TACS (Total Acces Communications System), que trabajaba en la banda de los 900MHz, lo que permitió por primera vez realizar llamadas mientras nos desplazamos sin estar conectados a una línea fija.

En la década de 1990 con el despliegue de las primeras redes GSM (Global System For Mobile Comunication), aparece la segunda generación (2G), que ya incluía tecnologías digitales, lo que mejoró las limitaciones presentes en la primera generación, mejorando tanto la calidad como la seguridad de las llamadas, añadiendo más capacidad de red y cifrando las comunicaciones. Con la aparición de las tecnologías digitales aparecen también nuevos servicios como los SMS (Short Message Services), añadiendo él envió de textos como forma de comunicación. En Europa, la ETSI (Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones) establece GSM como estándar de esta tecnología, el cual, combinando FDMA (frequency-division multiple access) y TDMA (Time-Division Multiple Access) para el multiacceso y empleando GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying) como modulación, logró alcanzar velocidades de 9,6 Kbps en la transmisión de datos. También aparece CDMA (Code Division Multiple Access) en América del Norte lo que mejora la eficiencia espectral.

Hacia finales de los años 90 y principios de los 2000, aparecen las tecnologías que impulsaron el avance hacia la tercera generación (3G), fueron nombradas como 2.5G y 2.75G, GPRS (General Packet Radio Service) y EDGE (Enhanced Data Rates for GSM Evolution), estas dos tecnologías aumentaron la transmisión de datos a 160 Kbps para GPRS y 384 Kbps para EDGE, hubo importantes cambios en la capa física, cambiando a una modulación más eficaz, 8-PSK (8-Phase Shift Keying). [1]

En torno al año 2000 se lanzan las redes de tercera generación, 3comúnmente conocidas como redes 3G, que gracias a la modulación QPSK (Quadrature Phase-Shift Keying) significó un salto bastante grande en las velocidades de transmisión de datos, permitiendo alcanzar velocidades de pico de 2Mbps, agilizando la interacción del usuario con las aplicaciones disponibles y aumentando el ancho de banda hasta los 5MHz, utilizándolo así en la propuesta europea WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access).

Buscando mejorar la velocidad de transmisión de datos aún más, aparecen las especificaciones HSPA (High Speed Packet Access) y más tarde las operadoras de telefonía móvil ofertan el sistema HSDPA, lo que provoca una nueva generación que en aquel entonces se llamó 3,5G, lo que suponía un cambio a la modulación 64QAM permitiendo alcanzar picos de 21Mbps de descarga. Esto impulsó una transformación digital bastante notable permitiendo que los teléfonos móviles se convirtieran en

dispositivos multifuncionales esenciales para la vida diaria, estimulando a su vez el crecimiento y la innovación en la industria del software y de las aplicaciones móviles.

Acercándonos a la década de 2010 surgen las especificaciones del sistema LTE (Long Term Evolution) lo que impulso el cambio del 3G a 4G llamándolo 3.9G, buscando un mayor rendimiento de los sistemas de comunicaciones móviles en propósito de conseguir disminuir la latencia del sistema y aumentar la velocidad de transmisión y recepción.

Empezando la década de 2010 surgen los primeros despliegues de redes LTE lo que origina la cuarta generación de comunicaciones móviles (4G), esta red consistía en un sistema multiacceso con múltiples subportadoras de banda estrecha, llamado OFDMA, logrando reducir interferencias y aumentado la eficiencia espectral. El sistema LTE mejoró considerablemente la velocidad de datos y la capacidad de red, permitiendo velocidades de descarga de pico de 100Mbps, elevándolo aún más con la aparición de LTE Advanced llegando a 1Gbps. Este incremento en la velocidad y calidad de la red facilitó el consumo masivo de contenido multimedia, streaming de video, y de las aplicaciones que dependían de conexiones rápidas y fiables, como juegos online (en línea) y videoconferencias/videollamadas.

El éxito de la tecnología LTE se refleja en que, en 2016, había 521 redes LTE en 170 países, 147 redes LTE-A en 69 países, más del 50% de la población mundial disponía de cobertura 4G en 2017, en 2018 ya había 700 redes LTE/LTE-A en 202 países.[1]

En las Figuras 1.1 y 1.2 se puede observar el desarrollo de las redes 4G descritas anteriormente.



Figura 1.1. Evolución anual del número de operadores (MNO) con despliegues de redes 4G. [1]



Figura 1.2. Países sin redes móviles 4G. [1]

En la Tabla 1.1. se puede observar una comparativa rápida de los sistemas descritos anteriormente.

Sistema	Multiacceso	Dúplex	Canalización	Modulación	Datos
GSM			GMSK 200 kHz	9,6 kbit/s	
GPRS	FDMA/TDMA	FDD		GIVISK	160 kbit/s
EDGE				8-PSK	384 kbit/s
UMTS	WCDMA/ FDMA/TDMA	FDD TDD	5 MHz	QPSK	2 Mbit/s
CDMA2000	FDMA/CDMA	FDD	1,25 – 3,75 MHz (UL) (3x1,25 o 5 MHz, DL)	QPSK	144 kbit/s – 2,4 Mbit/s
LTE LTE-A Pro	OFDMA (DL) SC-FDMA (UL)	FDD TDD	1,4, 3, 5, 20 MHz (100 MHz LTE-A)	QPSK, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM	100 Mbit/s 1 Gbit/s (LTE-A)

Tabla 1.1. Tabla comparativa de los diferentes sistemas. [1]

Una vez presentados los sistemas anteriores, vamos al despliegue del sistema 5G que finalizó sus especificaciones en lo que se conoce como IMT-2020 (telecomunicaciones móviles internacionales). La tecnología 5G representa un avance significativo en comparación con sus predecesoras, como la 4G, y está diseñada para ofrecer mejoras sustanciales en términos de velocidad, latencia y eficiencia en la conectividad. Esta nueva generación de redes puede alcanzar velocidades de hasta 10 Gbps, lo que la convierte en 100 veces más rápida que la 4G en algunos casos, lo que facilita una transmisión de datos más rápida y eficiente. Una de sus principales ventajas es la baja latencia, que puede reducirse a un milisegundo, lo que permite interacciones prácticamente en tiempo real. Es de suma relevancia para aplicaciones críticas, tales como los vehículos autónomos y la realidad aumentada o virtual, donde el lapso de respuesta es crucial. Las características de las redes de 5G se resumen en la Figura 1.3.



Figura 1.3. Requisitos del IMT-2020 para los sistemas 5G. [2]

La 5G, además, tiene la capacidad de soportar una mayor cantidad de dispositivos conectados simultáneamente, lo que es esencial en contextos como las ciudades inteligentes o grandes eventos, donde miles de dispositivos requieren acceso a la red de manera eficiente. Asimismo, esta tecnología está concebida para simplificar la interconexión de un gran número de dispositivos pertenecientes al Internet de las Cosas (IoT), como sensores industriales, electrodomésticos inteligentes o equipos médicos, lo que permitirá un control y monitoreo más efectivo en diversos sectores. Uno de los avances significativos de la 5G radica en su mayor eficiencia energética, lo que prolonga la duración de la batería de los dispositivos conectados a la red, un factor esencial para dispositivos o sensores que requieren un uso prolongado.

Los casos de empleo de la tecnología 5G son diversos, abarcando desde los vehículos autónomos que se encuentran en condiciones de baja latencia para comunicarse en tiempo real con la infraestructura vial, hasta la telemedicina, donde las consultas y procedimientos a distancia serán beneficiados por la mejora en la velocidad y la capacidad de la red. Además, la 5G será fundamental para fomentar la realidad aumentada y virtual, ofreciendo experiencias más inmersivas y fluidas debido a la mayor

velocidad de transmisión y la disminución del retardo en la red. Con relación a las tecnologías subyacentes que posibilitan la 5G, se destacan las ondas milimétricas (mmWave), las cuales permiten alcanzar elevadas velocidades, aunque poseen un rango limitado, y el MIMO masivo (Multiple Input Multiple Output), que utiliza múltiples antenas para mejorar la cobertura y capacidad de la red. También se apoya en el edge computing, que permite procesar los datos cerca de la fuente de generación, reduciendo así la latencia.

Sin embargo, la implementación de la 5G presenta ciertos retos. Uno de los aspectos más relevantes radica en la cobertura, ya que el despliegue de la infraestructura necesaria es arduo y requiere tiempo, especialmente en áreas rurales donde la densidad de dispositivos conectados es menor. A pesar de que la tecnología 5G está concebida con el propósito de mejorar la eficiencia energética a nivel de dispositivo, la existencia de múltiples antenas para asegurar una cobertura amplia podría incrementar el consumo energético global de la red. En conclusión, la 5G está cambiando el mundo de las telecomunicaciones y la conectividad con sus importantes mejoras en velocidad, capacidad y latencia, lo que abre la puerta a nuevas aplicaciones tecnológicas en múltiples sectores.

En la Figura 1.4. se puede observar el % de acceso a redes 5G y tráfico de banda ancha móvil en el año 2021. Se puede apreciar como las zonas con más población y más urbanizadas son las que más acceso tienen a las nuevas redes.



Figura 1.4. % acceso a redes 5G en 2021. [1]

1.3. Objetivos

Este TFG se centra en la mejora del sistema de medida del que dispone el grupo de Ingeniería de Sistemas, Antenas y Propagación (GISAR) de la Universidad de Cantabria, para utilizarlo como herramienta para el análisis y caracterización del canal radio en picoceldas de exterior con un número variable y elevado de usuarios activos, y en condiciones tanto de visibilidad directa (LOS) como de no visibilidad (NLOS) entre transmisor y receptor. Se tomarán medidas en la banda de 6.425GHz – 7.125HGz debido a que ha sido recientemente autorizado su uso para redes de comunicaciones móviles en el seno de la Conferencia Mundial de Radiocomunicación (WRC-23) celebrada en Dubái en noviembre y diciembre de 2023. Centrando el estudio en el enlace ascendente, el post procesado de las medidas permitirá obtener unos parámetros representativos del canal radio exterior para el escenario que se presentará más delante de este documento, en base a los cuales elaborar una discusión que permita contribuir al estado del arte actual. En este sentido, los parámetros utilizados para analizar el canal radio exterior serán el PDP, el ancho de banda de coherencia y la dispersión del retardo.

1.4. Estructura del documento

Este documento se organiza en cinco capítulos, siendo este el primer capítulo introductorio, en el que se ha explicado la situación del estado del arte, ilustrando la importancia que tiene la caracterización del canal radio en la planificación de los sistemas, además de explicar los objetivos de este TFG.

En el segundo capítulo del documento se abordará la caracterización del canal radio, explicando qué es el MIMO masivo y sus parámetros de interés para el enlace ascendente.

Posteriormente, en el capítulo 3, se explicarán los cambios y las mejoras realizadas sobre la sonda de medida utilizada como punto de partida en este TFG. Además, se expondrá cómo se han realizado los soportes mediante impresión 3D.

En el capítulo 4 se expondrán los resultados experimentales obtenidos y se realizará un análisis de estos, pasando por el análisis de varios perfiles potencia retardo, retardo cuadrático medio y ancho de banda de coherencia.

Para finalizar, en el capítulo 5 se hará un resumen de todo lo que se ha expuesto anteriormente, con las principales conclusiones y las futuras líneas de investigación que pueden seguirse para dar continuidad al trabajo realizado.

CAPÍTULO 2: CARACTERIZACIÓN DEL CANAL RADIO

2.1. MIMO Masivo

Una de las innovaciones que trae la nueva generación 5G es la implementación de técnicas como el MIMO masivo, cuyo objetivo es maximizar el uso de los recursos disponibles en el canal y mejorar así el rendimiento del sistema para optimizarlo. Con esta tecnología se logra la escalabilidad que no ofrecía el Multi-User MIMO (basado en MIMO punto a punto), lo que permite expandir el tamaño del sistema sin alcanzar el límite de Shannon.

MIMO es una tecnología de radiocomunicación que se basa en el uso de múltiples antenas tanto en el transmisor como en el receptor. Al contar con varias antenas, se puede aprovechar la dimensión espacial para mejorar el rendimiento del enlace inalámbrico, lo que se traduce en señales más fuertes, mayor fiabilidad y velocidades de transmisión más rápidas. En otras palabras, MIMO se refiere a cómo se gestionan las ondas de transmisión y recepción en antenas de dispositivos inalámbricos, como los enrutadores. En los sistemas inalámbricos tradicionales, la señal sufre degradaciones debido a las reflexiones, lo que provoca pérdida de calidad y de datos. MIMO aprovecha el fenómeno de la propagación multicamino para aumentar la velocidad de transmisión y reducir la tasa de error.

Además, se define como una red celular multiportadora compuesta por un conjunto de células que funcionan de manera sincronizada bajo el protocolo TDD (multiplexación por división en el tiempo). Con un número de antenas superior a uno, las estaciones base logran una visión casi determinista del entorno, lo que permite mayor fiabilidad, reducción de desvanecimientos y una disminución de la tasa de errores (BER) [3]. Cada estación base se comunica de manera simultánea con varios terminales móviles en diferentes instantes de tiempo o frecuencias. Las señales recibidas se procesan mediante combinación lineal y se transmiten con una alta directividad (beamforming). A medida que el número de antenas aumenta, estas deben estar lo suficientemente separadas para evitar la correlación de señal, asegurando así un mejor rendimiento.

Los "Large-Scale Antenna Systems" ofrecen beneficios de array, diversidad y multiplexado, un incremento del rendimiento y la eficiencia espectral, una reducción de la potencia radiada, y una simplificación del procesado de señales. Se pueden explicar tres características propias del MIMO masivo: [3]

- El multiplexado en ganancia a partir del uso de SDMA para brindar cobertura a los terminales móviles que comparten recursos de tiempo y frecuencia.
- Establecer un número de antenas por estación base superior al número de usuarios por célula para lograr una supresión eficiente de interferencias. Para mantener esta relación, la cantidad de antenas deberá aumentar en función del incremento de dispositivos.
- TDD para evitar valores elevados de CSI y el uso de modelos de aproximación del canal.

El número de antenas de la BS (estación base) es independiente del tiempo que comprende la obtención del CSI (propiedades conocidas del canal de un enlace de comunicación), lo cual solo se requiere para las estaciones base. El multiplexado de la precodificación lineal empleada en el enlace descendente, DL, con la demultiplexación del precodificado en el enlace ascendente, UL [4].

El esquema que sigue cada terminal móvil puede ser asociado con una configuración SIM, tal como se evidencia en la Figura 2.1. Los K usuarios transmiten datos Qk que son recibidos por las M antenas que conforman el sistema, y cuya respuesta frecuencia (usuarios-antenas) se denota mediante mk. Para recuperar cada símbolo transmitido de manera correcta, se combinan linealmente las señales recibidas correspondientes a su UE y se ponderan con el complejo conjugado de la estimación del canal respectivamente.



Figura 2.1. Ejemplo de sistema MIMO MxN en enlace ascendente [4]

Con el fin de concluir la descripción del modelo de MIMO masivo en el UL, se presentarán brevemente las técnicas para obtener una mayor diversidad espacial en la recepción. Al ignorar criterios como el Antenna Selection, Threshold Combining o Equal-Gain Combining, se pueden destacar las opciones que se encuentran de menor a mayor complejidad, es decir, mayor carga computacional [5]-[7]:

- Maximal Ratio Combining: Las señales de las distintas antenas se combinan coherentemente, ponderando con mayor peso las contribuciones de las ramas con mayor SNR (proporción de la señal a ruido). Empleando un filtro adaptado se consiguen separar las componentes ortogonales.
- Zero-Forcing: Consiste en aplicar el estimador Least-Square y posteriormente determinar qué solución es la más próxima al símbolo transmitido. Para eliminar la interferencia entre usuarios se hace uso de la matriz pseudo-inversa del canal MIMO. La dificultad computacional del algoritmo viene determinada por la obtención de esta matriz.
- Minimum Mean Square Error: En este caso, se utiliza el estimador MMSE en lugar del Least-Square. A partir de la correlación espacial obtiene estimaciones de las características estadísticas del canal. Para los casos en los que el conocimiento de las estadísticas es imperfecto, las ganancias no sufren fuertes variaciones.

La eficiencia espectral que se consigue en cada modelo está ligada al aumento de complejidad. Los resultados óptimos serán alcanzados mediante el uso del método final. No obstante, la opción más viable es la del Zero Forcing, ya que otorga un equilibrio entre las prestaciones y la carga computacional. En la Figura 2.2. y Figura 2.3. se puede apreciar el comportamiento de estos modelos, así como sus variantes, como el Regularized Zero-Forcing, single-cell MMSE y multi-cell MMSE: [3]



Figura 2.2. Comportamiento de los modelos frente a 100 antenas y un número de usuarios variable. [3]



Figura 2.3. Eficiencia espectral de los modelos para un número de antenas variable. [3]

Es necesario destacar la existencia de investigaciones alejadas de la definición canónica que fomentan alternativas para alcanzar el MIMO masivo, tales como el uso del protocolo FDD (duplexación por división de frecuencia), la utilización de múltiples antenas en los dispositivos móviles y la transmisión mono-portadora.

La utilización del FDD se presenta como una opción adecuada debido a la amplia variedad de bandas de frecuencias reservadas para este protocolo. No obstante, la complejidad que conlleva la estimación del canal hace inviable su implementación más allá de sistemas reducidos. Una alternativa sería la parametrización del canal de manera que su estimación no sea tan exigente.

En relación con el uso de múltiples antenas en terminales móviles, el principal beneficio es el notable aumento en la eficiencia espectral. Sin embargo, este avance viene acompañado de un incremento considerable en la complejidad y el costo del producto. Al aumentar el número de antenas, se incrementa también la cantidad de rutas de transmisión y recepción disponibles. En el UL, el número de antenas se traduce en el número de emisiones simultáneas hacia la estación base. Para que las señales sean distinguibles, es necesario conocer el vector que describe la respuesta del canal de cada antena y que estos vectores sean aproximadamente ortogonales entre sí. Esto implica que las señales deben tener diferente directividad espacial, lo que permite aprovechar la ganancia de array.

La efectividad de esta técnica depende de la visibilidad entre la estación base (BS) y el equipo de usuario (UE). En escenarios donde predomina la línea de vista (LOS), la posibilidad de aprovechar las ventajas completas del MIMO en los dispositivos móviles disminuye, ya que el ángulo de comunicación entre los extremos tiende a ser similar para todos los usuarios a larga distancia (campo lejano). Por el contrario, en situaciones con múltiples obstáculos que generan trayectorias sin línea de vista (NLOS), las diversas contribuciones permiten explotar mejor las capacidades del MIMO, maximizando sus beneficios en los terminales móviles.

2.2. Canal radio

El canal radio móvil es un medio altamente reflectante y dispersivo, donde tanto las estructuras creadas por el ser humano, como los edificios, tienen un impacto crucial en la propagación de la señal, sin olvidar factores como la orografía y la vegetación. La propagación entre el transmisor y el receptor ocurre a través de diversos mecanismos que afectan la señal: reflexión, difracción y dispersión (scattering). En el caso de los servicios móviles terrestres, el tipo de entorno (urbano, suburbano, rural o interiores), la frecuencia de operación y la altura de las antenas influyen notablemente en el comportamiento del canal radio, lo que afecta directamente al sistema de radiocomunicaciones.

La caracterización del canal radio es fundamental para apoyar el desarrollo y despliegue de sistemas de comunicación a nivel local, como los sistemas de comunicaciones móviles, que son uno de los principales ejemplos. En resumen, entender los factores que alteran la comunicación permite afrontar entornos difíciles para la instalación de estaciones base, garantizar condiciones óptimas de funcionamiento, corregir errores y, además, reducir costos mediante un diseño eficiente. Estos son los principales objetivos de la caracterización del canal y, por tanto, de este TFG.

Este TFG se centrará en el análisis experimental del canal radio en entornos exteriores. El estudio abordará, por un lado, el análisis de diferentes perfiles potencia retardo (PDP), la dispersión temporal y la selectividad en frecuencia del canal.

2.2.1. Caracterización del canal radio

Como es bien sabido, el canal radio no es un medio de transmisión guiado, sino un medio dispersivo y altamente reflectivo, lo que lo hace especialmente complejo de caracterizar. Su estudio resulta crucial para simular distintos entornos, realizar pronósticos, generar mapas de cobertura y llevar a cabo comparaciones entre diversos sistemas de comunicaciones. Este documento se enfocará en el análisis estadístico de un entorno exterior (outdoor), lo que permitirá aproximarse lo máximo posible a las condiciones reales.

El avance tecnológico en la 5G introduce nuevos requisitos para la evaluación y medición del canal, en comparación con los modelos de generaciones anteriores, que se enfocaban en frecuencias por debajo de los 6GHz. La principal innovación que se presenta está relacionada con la exploración tridimensional del canal, cuyo objetivo es expandir las investigaciones y desarrollar nuevas técnicas MIMO y de beamforming.

También se han logrado progresos en el trabajo con arrays de gran tamaño, la consistencia espacial lograda a partir de la interrelación entre los ángulos de salida y llegada, y la definición de las regiones de visibilidad, son algunas de las mejoras que se han logrado desde versiones iniciales, como el SCM (modelo de canal espacial) del 3GPP (Proyecto Asociación de Tercera Generación) [8] basado en el 3D GSCMs. El propósito por alcanzar se refleja en contribuciones como las de los proyectos WINNER o mmMAGIC [9] [10], fomentando la estandarización del canal 5G y su adaptación a modelos previos. En la actualidad, se han presentado propuestas de sistemas radio que satisfacen los requisitos expuestos por la IMT-2020.

2.2.1.1. Caracterización en banda ancha del canal

La caracterización experimental del canal radio requiere recopilar la información de las medidas de canal para, a partir de parámetros representativos, extraer conclusiones sobre el escenario en cuestión o modelos empíricos que permitan contribuir al análisis del canal en los entornos objeto del estudio. Las pérdidas de propagación del canal, con el objetivo de definir un modelo de pérdidas o el perfil potencia retardo, del cual puede extraerse información sobre la dispersión temporal o la selectividad frecuencial del canal, pueden considerarse como puntos de partida válidos. Por ejemplo, a partir de la respuesta impulsiva del canal se puede evaluar el PDP (perfil potencia retardo) y se pueden extraer conclusiones importantes sobre la dispersión temporal o el ancho de banda de coherencia, parámetros que han sido relevantes en la definición de los sistemas basados en MIMO masivo. A continuación, se presenta una breve explicación de cada uno de los aspectos reseñados.

Pérdidas de propagación

Las pérdidas de propagación se definen como la disminución de la densidad de potencia de una onda electromagnética en su interacción con el medio durante la comunicación. En su nivel de menor complejidad, se asocian con las pérdidas en espacio libre (2.1), correspondientes al vacío, y donde puede apreciarse su dependencia con la distancia y con la frecuencia a través de la longitud de onda [11]. No obstante, debido al multicamino, el modelo de pérdidas en espacio libre no se aplica al entorno urbano.

$$L_{bf} = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right) (dB)$$
(2.1)

Se debe evaluar este parametro con mayor importancia en situaciones donde el ancho de banda de la señal supera al de coherencia, evaluando así la selectividad en frecuencia. Se utiliza el teorema de Parseval para detectar las pérdidas en el dominio de la frecuencia en comparación con las situaciones de UWB, mediante la fórmula de Friis generalizada [12].

$$PG = \frac{P_r}{P_r} = \sum_{n=0}^{N-1} |h[n]|^2 = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |H[k]|^2$$
(2.2)

En la exposición (2.2) se exhibe la ganancia de propagación, la cual se relaciona con las potencias recibidas y transmitidas, P_r y P_t respectivamente; h representa la respuesta al impulso con N muestras. Si el canal se caracteriza de forma experimental y se mide la función de transferencia compleja del mismo para una disposición concreta de transmisor y receptor, utilizando un analizador de redes (VNA) previamente calibrado en los extremos de los cables de radiofrecuencia, entonces H representa la función de transferencia compleja del con los N tonos medidos, y que coincidirá con el parámetro de scattering de la medida S_{21} .

De acuerdo con la disposición de medida expuesta en el párrafo anterior, si el VNA se calibra en los extremos de los cables, será necesario corregir H para compensar el efecto de las antenas, de acuerdo con (2.3), y tal que las pérdidas de propagación pueden calcularse según (2.4).

$$H'[k] = \frac{H[k]}{\sqrt{g_t[k]g_r[k]}} = \frac{S_{21}[k]}{\sqrt{g_t[k]g_r[k]}}$$
(2.3)

$$PL(dB) = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \frac{|S_{21}[k]|^2}{\sqrt{g_t[k]g_r[k]}} \right)$$
(2.4)

Perfil potencia retardo (PDP)

El perfil potencia retardo, PDP, es un reflejo de la influencia del canal sobre la señal, lo que indica la distribución de la potencia recibida ante la dispersión temporal de las diferentes componentes del multicamino. Las diversas contribuciones a la señal recibida se justifican por el efecto que introduce el multicamino, contribuciones que llegan con diferentes niveles y retardos al receptor. De esta manera, considerando el nivel de potencia, se puede establecer una distinción entre el rayo directo, reflexiones de distinta orden, difracciones e incluso por la combinación de ambas últimas. El análisis del PDP en una disposición transmisor-receptor posibilita la creación de un rango temporal que permita evaluar las variaciones y variabilidad del medio. En conclusión, del PDP puede extraerse datos para analizar la dispersión temporal del canal y la selectividad frecuencial, utilizando parámetros como el RMS Delay Spread y el ancho de banda de coherencia, respectivamente.

El RMS Delay Spread es probablemente el parámetro más relevante para determinar la extensión temporal del retraso temporal del multicamino en el canal radio. Se define, con (2.5), como la raíz cuadrada del segundo momento central del PDP, la cual se trata como una distribución estadística de la potencia asociada con cada retardo. En (2.5), las expresiones de cálculo del retardo cuadrático medio y del retardo medio del canal vienen proporcionadas por (2.6) y (2.7), respectivamente.

$$\tau_{rms} = \sqrt{\overline{\tau^2} - (\overline{\tau})^2} \tag{2.5}$$

$$\overline{\tau^2} = \frac{\int_{\tau_{min}}^{\tau_{max}} \tau^2 P(\tau) d\tau}{\int_{\tau_{min}}^{\tau_{max}} P(\tau) d\tau}$$
(2.6)

$$\overline{\tau} = \frac{\int_{\tau_{min}}^{\tau_{max}} \tau P(\tau) d\tau}{\int_{\tau_{min}}^{\tau_{max}} P(\tau) d\tau}$$
(2.7)

El análisis de este parámetro posibilita, entre otros aspectos, la evaluación de la interferencia intersimbólica, responsable de la VER (Bit Error Rate) y en términos generales de la comunicación. Al investigar los datos extraídos y comparar el tiempo de símbolo y el ancho de banda empleados, se puede definir la situación del enlace, y la necesidad o no de usar ecualización o recurrir a técnicas como la OFDM [13].

En una primera aproximación, un valor de τ_{rms} inferior a la duración de un símbolo, bit o ráfaga, requerirá disponer de un canal plano, y, por ende, evitar la ISI. En la práctica, en las transmisiones continuas, este ensanchamiento de la señal transmitida por el efecto de las múltiples réplicas del multicamino puede provocar la degradación del sistema debido a la distorsión y al ISI.

En el ámbito de la frecuencia, el análisis de la selectividad frecuencial del canal se centra en el ancho de banda de coherencia, el cual puede extraerse a partir de la función de correlación con la frecuencia del canal, vinculada al PDP y vista como la transformada de Fourier de este, según lo establecido en (2.8).

$$R(\Delta f) = \int_{-\infty}^{\infty} P(\tau) e^{-j2\pi\Delta f \tau} d\tau$$
(2.8)

Al evaluar la correlación del canal en función de la separación frecuencia, se establece al ancho de banda de coherencia como el rango de frecuencias en las que el canal mantiene un comportamiento plano. Disponer de un ancho de banda de coherencia superior al de la señal transmitida, conlleva a prevenir la selectividad en frecuencia. Considerando una aplicación práctica de la formulación, si se mide experimentalmente la función de transferencia compleja del canal debidamente muestreado con N tonos, resulta interesante una representación alternativa a (2.8) como la que se muestra en (2.9). Esta representación representa la transformada de Fourier del PDP, siendo éste calculado a partir de la respuesta impulsiva del canal, la cual a su vez puede calcularse como la transformada inversa de Fourier de la función de transferencia realmente medida.

$$R_{HH}[q] = \sum_{n=0}^{N-1} |h[n]|^2 e^{(-j\frac{2\pi}{N}nq)}$$
(2.9)

La relación inversa entre ambos dominios, es decir, que existe entre el RMS delay spread y el ancho de banda de coherencia, se plasma en (2.10), donde a partir del valor que tome la constante α se obtienen los diferentes grados de correlación típicos que aparecen en la literatura, como el 50%, 70% y 90%.

$$Bc = \frac{1}{\alpha \tau_{rms}} \tag{2.10}$$

El análisis de las expresiones previas se ajusta a lo esperado en la práctica: a mayor grado de correlación entre las respuestas en frecuencia del canal, mayor será la separación en frecuencia o el rango de frecuencias que cumplen, lo que representa el ancho de banda de coherencia del canal.

Al llegar a este punto, podemos introducir los bloques de coherencia [14] De acuerdo con el modelo de Clarke, se observa la presencia del lapso de coherencia con un nivel de correlación del 70%.

$$T_c = \frac{9\lambda}{16\pi\nu} \tag{2.11}$$

el número de muestras por bloque es:

$$N_c = B_c T_c \tag{2.12}$$

Para las situaciones en las que las diferencias entre los diferentes niveles de correlación sean notables, será necesario seleccionar el porcentaje de correlación adecuado para considerar el canal como plano durante el ancho de banda establecido.

CAPÍTULO 3: SONDA DE MEDIDA DEL CANAL RADIO

3.1. Introducción.

En este capítulo se presenta el diseño y funcionamiento de la sonda de medida de canal radio ya existe y actualizada en el marco de este TFG, ya que será utilizada para abordar la campaña de medidas para la futura caracterización de la banda de 6GHz.En la Figura 3.1. se pueden observar 3 regiones y las frecuencias que abarcan cada una de ellas, en nuestro caso, España se encuentra en la región 1.

Se procederá a caracterizar la banda de 6GHz, esta quedó en estudio para su utilización en IMT en la Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones de 2019 (WRC-19), recientemente ha sido autorizada para aplicaciones IMT en la WRC-23. La duda fue escoger si caracterizar únicamente la parte central de la banda inferior, f=6.725GHz con 600MHz de BW, o pillar toda la banda, tal que f=6.775GHz con un BW de 700MHz. Se decidió escoger la segunda opción, ya que a efectos de propagación los resultados no cambiarán mucho, pero el ancho del pulso varia 100MHz de una situación a la otra.

6425-7125 MHz (Agenda Item 1.2)

WRC-23 outcome	6425-7025 MHz 7025-7125 MHz			
Region 1	5.6A12. IMT identification in Region 1			
Region 2	5.6C12: IMT identification in B	5.6C12: IMT identification in Brazil and Mexico		
Region 3	5.6812: IMT identification in Cambodia, Laos and the Maldives	5.6412: IMT identification in Region 3		

Figura 3.1 Asignación de frecuencias a Regiones UIT en el marco de la WRC-23.

3.2. Sonda de medida.

Como ya se ha expuesto en capítulos anteriores, el objetivo principal de este TFG se centra en mejorar el sistema de medida del canal radio del que dispone el grupo GISAR, y utilizar el nuevo sistema para llevar a cabo una campaña de medidas para con ayuda de estas caracterizar la banda de 6GHZ (6.425-7.125GHz). La anterior sonda de medida con la que históricamente el grupo GISAR ha realizado las medidas de canal radioeléctrico, estaba hasta ahora dedicada a la realización de medidas en entornos de interior, principalmente debido a diferentes limitaciones técnicas del sistema de medida.

El sistema de medida actual utilizado para medidas previas por el grupo GISAR consistía en un escáner plano con un analizador de redes (VNA P5006A), que se muestra en la Figura 3.2, un ordenador de sobremesa como elemento de control y adquisición de medidas, un escáner 2D, que simula un array virtual controlado por dos servomotores que le desplazan en el plano YZ, y por último las antenas transmisora y receptora. Todo el equipo se muestra en la Figura 3.3.

A continuación, describiremos la sonda de canal con la que el grupo investigador ha estado realizando las medidas hasta ahora. El equipo posee un analizador de redes de última generación, que es capaz de realizar medidas desde los 100KHz hasta 32GHz, el cual se puede ver en la Figura 3.2. Seguimos con el equipo encargado de realizar medidas en distintos puntos del espacio, para ello el equipo posee un escáner plano. Este está formado por dos unidades lineales y dos servomotores que funcionan bajo las indicaciones de los controladores de posición, conectados al ordenador a través del puerto serie. El principal problema con el escáner era el cómo moverlo hasta el punto de medida, para ello se usó un carrito donde subimos el escáner para así transportarlo hasta el exterior. Finalmente, el equipo estaba conectado mediante cables de radiofrecuencia (RF), lo que reducía mucho el rango dinámico del sistema. Estos cables unían el analizador de redes con las antenas y resto del equipo.



Figura 3.2 VNA P5006A de Keysight Technologies





Figura 3.3. Esquemático de la sonda de canal: (a) Sonda de canal física; (b) Diagrama de bloques de la sonda de canal.

Como antenas transmisora y receptora podrán utilizarse las más convenientes según la banda de frecuencias bajo estudio. Como ejemplo, en las Figuras 3.4 y 3.5 se muestran una antena de bocina piramidal y una antena omnidireccional de banda ultraancha que fueron utilizadas por el grupo GISAR en medidas previas realizadas en el marco de otros proyectos en la banda de 26 GHz. La antena omnidireccional sobre el esquema de la Figura 3.3 (b) se utilizaría como antena transmisora, emulando a un usuario móvil de la celda en cuestión, y la antena de bocina sería la que, colocada sobre el escáner plano nos permitiría emular el array virtual MIMO.



Figura 3.4 Antena tipo bocina



Figura 3.5 Antena omnidireccional

Esta sonda de canal presentaba un principal problema, el rango dinámico que tenía en las medidas debido a los cables de RF, ya que estos tenían una atenuación muy elevada. Por ello en este TFG se propone mejorar la sonda introduciendo sistemas de RF-Ópticos que proporcionen mayor rango dinámico y por ende menores pérdidas, dando así la posibilidad de tomar medidas a mayor distancia. Este nuevo conversor de RF sobre fibra (RFoF) se puede ver en la Figura 3.6. y sus especificaciones técnicas se pueden ver en la Tabla 3.1.



Figura 3.6 Equipo óptico a implementar

Parameter	Min	Тур	Max	Units
Frequency range	1		40	GHz
Gain		0		dB
Gain flatness			± 3.5	dB
IP1dB		10		dBm
OP1dB		10		dBm
SFDR		95		dB/Hz ^{2/3}
RF input			+20	dBm
Optical output power		+6.5	+10	dBm
Operating Temperature	-10		50	°C
Operating distance		200		m
Input / Output Impedance		50		Ω
IP protection grade	IP20			
Electrical RF interfaces	2.4mm (f)			
Dimensions	271x116x39 mm			

Tabla 3.1. Características del equipo de RF-Óptico

Otra mejora que se implementa en este TFG es el cambio del tipo de antena receptora, y donde antes teníamos un único elemento que movíamos punto a punto para emular el array, ahora se introduce un array cuadrado de 2x2 antenas de parche que permiten reducir el número de movimientos con el escáner para un tamaño preestablecido del array MIMO masivo. Hay que resaltar que, en términos de tiempos de medida, el principal cuello de botella del sistema de medida lo constituye el movimiento entre puntos de la antena sobre el escáner plano. Esta nueva antena se muestra en la Figura 3.7.





⁽b)

Figura 3.7. Antena parche 2x2, (a) Antena física, (b) Antena medidas radioeléctricas

Para completar esta mejora y tomar cuatro medidas por cada posición del array, se precisa complementar el array con un conmutador de radiofrecuencia (RF), que nos permitirá conmutar las 4 medidas realizadas por la antena 2x2. Para ello es necesario comprobar que los cuatro puertos de la antena tengan las mismas pérdidas de inserción, debido a esto se caracterizó, y el resultado se puede ver en la Figura 3.8.



Figura 3.8. Pérdidas inserción antena 2x2

Así pues, el array virtual de la sonda de medidas quedaría tal como se puede ver en la Figura 3.9., quedando entre parche y parche de la antena siempre $0,5\lambda$.



Figura 3.9. Array virtual.

Resumiendo, las mejoras implementadas dan la posibilidad de tomar medidas a más distancia, debido a la mejora en las pérdidas de los dispositivos ópticos, menos tiempo de medida, lo que genera más estacionariedad de canal o en cambio más medias en el mismo tiempo de medida que en la sonda anterior.

En lo que respecta a las antenas utilizadas en la campaña de medidas empleada como referencia en este TFG, en transmisión se ha utilizado una antena omnidireccional de banda ancha (2-18 GHz), en concreto el modelo EM-6865 de Electrometrics. En la recepción, la antena utilizada es el array 2x2 de antenas de parche. Ambas antenas tienen polarización lineal y sus principales características se muestran en la Tabla 3.2.

6 425 – 7 125
7
1
1
20
0.2025
15

Tabla 3.2. Valores para la configuración de las medidas.

En la Figura 3.10. se puede ver la ventana de configuración del analizador de redes VNA P5006A, donde los settings respecto a la frecuencia son:

- Frecuencia inicial: 6.425 GHz
- Frecuencia final: 7.125GHz
- Parámetro a medir: S21
- Ancho de banda IF: 1KHz
- Potencia de salida: 7dB



Figura 3.10. Ventana de configuración VNA P5006A

Como ya se ha dicho anteriormente las mediciones se han realizado en el rango de frecuencia de 6.425 a 7.125GHz. Con respecto a la traza S21 que nos interesa, se consideran Nf = 22334 tonos de frecuencia, con un Δf = 30KHz espaciados en el ancho de banda considerado. La resolución en frecuencia conduce a una distancia máxima de 1000m aproximadamente, lo que nos lleva a un dwell time de 3300ns, este parámetro es el tiempo desde que se sintoniza un tono en el puerto 1 hasta que se toma la muestra en el puerto 2 del VNA. Por lo que en el momento de procesar la señal y de la toma de datos no es posible tener contribuciones en instantes de tiempo superiores a este dwell time.

Una vez recopilados todos los datos necesarios, se procede a realizar un balance de enlace para saber el rango dinámico que tenemos de margen para la campaña de medidas. Una vez realizados todos los cálculos pertinentes el rango dinámico del nuevo sistema de medidas supera los 100m lo que es perfecto para la campaña de medidas de este TFG.

En la Figura 3.11. se muestra el diagrama de bloques de la sonda actualizada con la que se realizó la campaña de medidas.



Figura 3.11. Ventana de configuración VNA P5006A

3.3. Soportes de antena y conmutador

Frente a la necesidad surgida en el planteamiento de este TFG, se pensó en diseñar soportes que sirvieran de apoyo a las antenas y al conmutador de radiofrecuencia (RF). Estos soportes se diseñaron mediante el programa *Autodesk fusión®* y se imprimieron en el laboratorio de fabricación del Dpto. de Ingeniería de Comunicaciones de la Universidad de Cantabria mediante una impresora 3D.

El papel fundamental de estos soportes es amortiguar posibles torsiones mecánicas de los cables en el proceso de medida y sostener las antenas y el conmutador sobre el mástil del posicionador plano.

Se parte de un boceto inicial muy básico que se tomó como punto de partida. Este boceto, que se muestra en la Figura 3.12, contenía 4 agujeros redondos con intención de pasar los cables de RF a través de ellos, un pequeño soporte frontal para aguantar la antena, un nervio central para dar firmeza a la estructura y dos pequeños agujeros en el nervio para 2 soportes de cables.



Figura 3.12. Boceto inicial del soporte de antena y cables.

Una vez plasmadas las ideas en el boceto inicial se llegó a la conclusión de que esa idea no era del todo correcta, debido a que el soporte frontal, los agujeros para los cables y la manera de sujetar los cables podría llegar a dar problemas. Como alternativa, se optó por cambiar la forma de fijar la antena al soporte, pegándola con cinta de doble cara, incluyendo unos soportes donde se pretende que vayan apoyados los cables de RF.

Como se dispone de tres agrupaciones de antenas distintas, cubriendo las bandas de 3.6, 6.7 y 26 GHz, se extrapolaron con matices las ideas anteriores, obteniendo como resultado los soportes que se muestran en las Figuras 3.12-3.14.





(b)

Figura 3.13. Soporte para agrupación de antena 2x2 en la banda de 3.6 GHz. (a) Diseño. (b) Soporte fabricado.



(a)

(b)

Figura 3.14. Soporte para agrupación de antena 2x2 en la banda de 6.7 GHz. (a) Diseño. (b) Soporte fabricado.





(b)

Figura 3.15. Soporte para agrupación de antena 2x2 en la banda de 26 GHz. (a) Diseño. (b) Soporte fabricado.

Una vez finalizados los soportes respectivos a las tres antenas, se decide diseñar otro soporte para el conmutador de RF, con espacio para que salgan los conectores de RF y la toma de alimentación trasera, el principal objetivo de este soporte es fijar el conmutador al mástil para prevenir caídas o daños mayores.

Este soporte consta de 3 partes las cuales se muestran en la Figura 3.15.





(b)



(c)





Figura 3.16. Soporte para conmutador de RF. (a) Diseño soporte conmutador. (b) Abrazadera inferior. (c) Abrazadera superior. (d) Diseño fabricado

Una vez finalizados y fabricados los soportes, se procede al montaje del equipo, se conectan 4 cables de RF a los puertos del conmutador y a los parches de la antena, como se puede apreciar en la Figura 3.16.



Figura 3.17. Montaje de los soportes y antena

CAPÍTULO 4: RESULTADOS

4.1. Descripción del entorno de medida

En esta sección se presenta la picocelda donde tuvo lugar la campaña de medidas del canal radio MIMO masivo que se han utilizado en este TFG para contribuir a su análisis y caracterización.

El entorno de interés se corresponde con la Plaza de la Ciencia situada en el campus de la Universidad de Cantabria. Esta ubicación presente en la Figura 4.1, presenta un entorno abierto, con la Facultad de Ciencias justo enfrente de la posición del escáner. Además de eso, en el momento de la toma de medidas había un equipo de obras situado al lado de la Facultad previamente nombrada, lo que presenta elementos metálicos en el entorno, además de los elementos fijos como son la cubierta metálica de la estación de autobuses y la cubierta metálica de la entrada al Edificio I+D+i Prof. José Luis García García de la Universidad de Cantabria.

Las medidas se realizaron emulando varios usuarios activos mediante el movimiento de la antena transmisora a lo largo de toda la plaza para así contemplar situaciones LOS y NLOS. El mástil de la antena tenía una altura de 1.4m, lo que representa con cierta exactitud la ubicación del teléfono móvil de un usuario.



Figura 4.1. Posicionamiento de los diferentes transmisores.

Distancia Transmisor dx(m) dy(m) Teórica(m) Centro del array 0 0 -----37.3 7.6 39.4 1 2 19.1 0 19.5 3 19.1 -9.2 21 4 19.1 13.4 24 5 19 -22.6 30 6 18.5 32 29.3 7 12 -36.5 56 8 37.2 2 38.5 9 30.8 37.1 48.5 10 36.1 -6.27 36.5 11 29.3 -18.8 33.8 12 40.8 25.4 49.7 13 10 13.7 18.4

 Tabla 4.1. Posición de transmisores y distancia entre transmisor y centro del array receptor. Nota:

 se utiliza como origen de coordenadas la posición del escáner.

4.2. Resultados

El procesado de las medidas se realiza en MATLAB, utilizando las aplicaciones desarrolladas por el grupo GISAR. Este programa, cuya interfaz principal se muestra en la Figura 4.2, permite procesar los ficheros de las medidas para facilitar su análisis y poder evaluar las características del canal.



Figura 4.2. Interfaz principal del software para el análisis del canal.

Una vez hacemos "click" en el apartado que nos interesa en relación con este TFG, que es el botón "PDP", nos aparecerá la ventana de la Figura 4.3., donde la primera casilla a rellenar es el lugar donde queremos guardar los ficheros de salida, seguido de esto añadimos el fichero de datos S21 del transmisor del que queremos sacar el PDP.

Como ya se ha dicho en los capítulos anteriores el rango de frecuencias a analizar comprende de 6.425 a 7.125GHz. Ingresamos el número de puntos y hacemos "click" en "run", al estar la casilla "check TH" marcada nos mostrara la combinación de todos los PDP del transmisor, como se puede ver en la Figura 4.4., a su vez nos mostrara el máximo ruido y el máximo de la señal. Usamos esos dos valores para calcular el umbral de ruido del PDP promedio, que es el que usaremos para caracterizar el canal.

save	H:\Canal_v2.1\Tempo	Ready
Meas. Data	H:\Canal_v2.1\Ficheros Matlab\S21_TX1.mat	
arameters		
arameters Floor Level (-dB): Label caption:	30 Check TH TX1	
arameters Floor Level (-dB): Label caption: Min. Freq (GHz):	30 Check TH TX1 6.425	
arameters Floor Level (-dB): Label caption: Min. Freq (GHz): Max. Freq (GHz):	30 Check TH TX1 6.425 7.125	

Figura 4.3. Interfaz análisis de los PDP.



Figura 4.4. PDPs del transmisor 1.

En las siguientes subsecciones se expondrán los principales resultados obtenidos del análisis de las medidas realizadas.

4.2.1. Perfil potencia retardo

Observando los diferentes PDPs, la representación de las diverses contribuciones que produce cada transmisor da a lugar a resultados similares para los transmisores que están en la misma situación respecto a la posición del escáner, así pues, describiremos cada grupo de transmisores por separado:

- Grupo 1: Tx2, Tx3, Tx4. Estos transmisores están en línea de visión directa a pocos metros del escáner plano, y como se puede apreciar en la Figura 4.5 (b)-(d), los tres presentan un claro rayo directo, en torno a los 252ns. El Tx3 y el Tx4 presentan una segunda contribución que podemos asociar con una reflexión con el edifico de la Facultad de Ciencias que estaba justo detrás de estos, así pues, en el umbral de 600ns a 1000ns se dan contribuciones de las demás reflexiones que ha originado en entorno. Como podemos observar que estas reflexiones no obtienen demasiada participación en el PDP del Tx2 como muestra la Figura 4.5(b). Por último, en el transmisor 3 se puede apreciar como una contribución supera el nivel de ruido en torno a los 1055ns.
- Grupo 2: Tx1, Tx8, Tx10. Estos transmisores están situados justo en el plano detrás de la estatua, y respecto a las líneas de visión, Tx1 está completamente oculto para el escáner (NLOS) situado detrás de la estatua, la línea de visión del Tx8 está en un punto medio entre NLOS y LOS debido a que está entre los arbustos del centro de la plaza y, por último, Tx10 está en LOS con el escáner. Podemos apreciar una gran diferencia entre el transmisor 1 y los transmisores 8 y 10, como se muestra en la Figura 4.5(a) y en la Figura 4.6(b) y Figura 4.4(d). En el PDP del transmisor 1 se pueden apreciar varias contribuciones importantes debidas a las reflexiones con el terreno, en torno a los 250ns aparece una contribución originada nuevamente por la Facultad de Ciencias y en torno a los 640ns aparece otra contribución que podemos asociar a una segunda o tercera reflexión, por ultimo podemos observar que el nivel de ruido presente entorno a los -55dB se hace mayor que la señal transmitida entorno a los 1500ns debido a la situación donde se encuentra este transmisor. Respecto a los transmisores 8 y 10, podemos apreciar que el transmisor 8 presenta contribuciones más claras que el transmisor 10, observando este entorno a los 230ns, nuevamente se pueden asociar con reflexiones con el edificio de la Facultad de Ciencias.
- Grupo 3: Tx6, Tx9, Tx12, estos transmisores están situados a la izquierda de la estación de medida, los tres tienen detrás la estación de autobuses con la cubierta metálica. Observando los PDP de la Figura 4.5(f) y de la Figura 4.6(c) y Figura 4.6(f), podemos apreciar que son prácticamente iguales. Todas presentan numerosas contribuciones debidas a la cubierta metálica previamente expuesta al principio del párrafo.

- Grupo 4: Tx5, Tx11 estos transmisores se encuentran ubicados justo en la curva, al lado de la carretera, ambos en situación LOS, en caso del Tx5 en el momento de la medida había un coche al lado del transmisor. Respecto a los PDP son prácticamente iguales, como se puede observar en la Figura 4.5(e) y en la Figura 4.6(e) ambas presentan un rayo directo muy claro, pero en el caso del transmisor 11 se pueden apreciar varias contribuciones importantes justo después del rayo directo, en torno a los 147ns debido probablemente a reflexiones con la Facultad de Ciencias, ambos PDP presentan contribuciones entorno a los 1000ns que podemos asociar a varios rayos reflejados por el medio.
- Grupo 5: Tx7 y Tx13 estos transmisores se encuentran en ubicaciones bastante conflictivas en el entorno de medida, el Tx7 se encontraba justo detrás de la cubierta metálica que cubre la entrada de las escaleras al edifico José Luis García, dando lugar a múltiples reflexiones presentes en su PDP Figura4.6 (a). El Tx13 aparentemente no era muy conflictivo, pero como se puede apreciar en su PDP Figura 4.7, presenta varias contribuciones asociadas a la estatua que tenía justo al lado. Respecto al transmisor 7, en situación de NLOS, se puede observar que llegan 3 contribuciones al principio del PDP una en 137ns, la segunda en 188ns y la tercera en 244ns. Este PDP es bastante complejo debido a que por las reflexiones con la cubierta y por el tipo de material llega con más potencia un rayo reflejado que el propio rayo directo, como se puede apreciar en la Figura 4.6(a), como se puede apreciar en la figura previamente nombrada, este PDP tiene otras dos contribuciones importantes, una sobre los 437ns y la otra sobre 1017ns asociadas a varias reflexiones, difracciones o mezcla con el entorno.

Haciendo referencia a lo discutido en el punto 2.2 del documento, la caracterización del canal radio y de los PDP debe llevarse a cabo mediante el cálculo de otros parámetros que resumen el comportamiento del canal en banda ancha. El RMS Delay Spread para hallar la dispersión temporal, y el ancho de banda de coherencia y sus distintos niveles serán calculados y representados con este propósito.



Figura 4.5 PDPs a) PDP del transmisor 1, (b) PDP del transmisor 2, (c) PDP del transmisor 3, (d) PDP del transmisor 4, (e) PDP del transmisor 5, (f) PDP del transmisor 6.



Figura 4.6 PDPs a) PDP del transmisor 7, (b) PDP del transmisor 8, (c) PDP del transmisor 9, (d) PDP del transmisor 10, (e) PDP del transmisor 11, (f) PDP del transmisor 12.



Figura 4.7 PDP del transmisor 13

4.2.2. RMS Delay Spread

En la Figura 4.6. se recoge la dispersión del retardo en función de la distancia, como podemos apreciar los valores van principalmente de 12ns a 250ns siendo valores relativamente elevados. Este valor tiende a ser más alto en entorno urbanos que en interiores de edificios, donde las señales pueden reflejarse en edificios, puentes y otras estructuras, afectando a la calidad de la señal. En la Figura 4.6 puede observarse que no hay una clara correlación del RMS Delay Spread con la distancia, tampoco con las situaciones LOS o NLOS. Este suceso es debido a que al ser un entorno exterior las diferentes reflexiones, difracciones y demás sucesos adversos hacen que este parámetro acabe variando.

Si comparamos la Figuras 4.6. con la Figura 4.7. se puede apreciar este claro aumento en los valores del retardo temporal, pudiendo apreciar que en interiores si parece seguir una correlación con la distancia, al contrario que en el caso de entornos exteriores.



Figura 4.8. Resultados del RMS Delay Spread en función de la distancia en entornos exteriores.



Figura 4.9. Resultados del RMS Delay Spread en función de la distancia en entornos interiores. [15]

4.2.3. Ancho de banda de coherencia

Como ya se ha dicho previamente el ancho de banda de coherencia se refiere al intervalo de frecuencias dentro del cual las variaciones de fase y amplitud de la señal se mantienen relativamente constantes. Si una señal ocupa un ancho de banda mayor que el ancho de banda de coherencia del canal, experimentará desvanecimientos selectivos en frecuencia, donde algunas frecuencias de la señal pueden atenuarse más que otras. Es inversamente proporcional al RMS Delay Spread del canal, por lo tanto, los valores descritos a continuación pueden comprobarse fácilmente.

En la Figura 4.7 el ancho de banda de coherencia cumple con los valores esperados respecto a los valores que toma el RMS Delay Spread, ya que el ancho de banda de coherencia es inversamente proporcional retardo temporal, en la Tabla 4.2. se recogen los valores más importantes.

Nivel (%)	$Bc_{min}(MHz)$	$Bc_{max}(MHz)$	$Bc_{mediano}(MHz)$
50	120.55	190.96	170.33
70	19,32	132.43	105.52
90	1.71	66.14	20.53

 Tabla 4.3.
 Valores más significativos del ancho de banda de coherencia para cada uno de los niveles de correlación considerados



Figura 4.10. Anchos de banda para los diferentes transmisores a) Transmisor 3, (b) Transmisor 4, (c) Transmisor 6, (d) Transmisor 8

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES

5.1. Conclusiones

El objetivo de este TFG se centra en el análisis del canal radio outdoor de una picocelda en condiciones de Massive MIMO para sistemas 5G. Para ello se realizó una campaña de medidas con el grupo GISAR (6.425-7.425GHz) en situaciones tanto NLOS como LOS, y se caracterizó el canal en banda ancha utilizando como métricas parámetros como el RMS Delay Spread o el ancho de banda de coherencia. En este sentido, desde el punto de vista experimental, en este TFG se ha contribuido a mejorar la sonda de medida, diseñando y construyendo soportes para los nuevos arrays de antenas utilizados.

El análisis de los PDP promedios de los transmisores refleja un comportamiento similar entre transmisores con similar ubicaciones y escenarios, indicando la importancia de la distancia y el ángulo de incidencia que dan lugar a diferentes contribuciones del multicamino presentando diferentes tiempos de recepción y potencia. Respecto al RMS Delay Spread podemos decidir que no hay una correlación clara entre la distancia y los valores que toma, ya que en los escenarios exteriores intervienen diversos efectos del entorno, como reflexiones múltiples en edificios, que intervienen de forma difícilmente previsible. Los valores de este parámetro varían entre 12ns-250ns.

Respecto al ancho de banda de coherencia, que mide la calidad de transmisión, ya que, si el ancho de banda del sistema es mayor que el de coherencia, este puede experimentar distorsiones debido a interferencias (ISI) e debidas a las componentes multitrayectoria. Se observa que tiene valores esperados debido a las circunstancias del entorno, tomando valores en relación con el retardo temporal.

Los resultados obtenidos son novedosos y permiten al grupo investigador aumentar los conocimientos sobre el canal radio en exteriores en una banda de frecuencias que se prevé recibirá gran atención en los próximos años por parte de las operadoras.

5.2. Líneas futuras

Dado que durante este TFG se han diseñado diferentes soportes para parches de antenas, una opción es realizar la misma campaña de medidas con los otros dos soportes y antenas, tanto como el de 3.6 GHz como el de 26 GHz, en entornos outdoor similares al planteado en este TFG.

Otra opción para implementar es aumentar el número de usuarios y el número de medidas por usuario ya que durante la campaña de medidas que se realizó en este TFG surgieron diferentes obstáculos para la toma de medidas como son los transeúntes, vehículos, clima y demás factores que no se pueden evitar, así pues, con más medidas mejor será la toma estadística de estas, mejorando así y acercándonos a una situación real.

Por otra parte, con la nueva sonda de medida puede pensarse también en realizar medidas interior-exterior, algo de gran interés y donde la información y los modelos de canal son escasos.

REFERENCIAS

[1] J. R. Pérez, "Comunicaciones Móviles e Inalámbricas", disponible en <u>https://personales.unican.es/perezjr/CMEI/</u>.

[2] J. Restrepo, *"Espectro para 5G: Desafíos regulatorios, económicos y financieros"*, Agosto 2019.

[3] J. H. L. S. Emil Björnson, Massive MIMO Networks: Spectral, Energy, and Hardware Efficiency, Now Publishers, 2017.

[4] T. L. Marzetta, "Massive MIMO: An Introduction" en Bell Labs Technical Journal, vol. 20, pp. 11-22, Enero 2015, doi: 10.15325/BLTJ.2015.2407793

[5] J. M. Ibáñez "Comunicaciones Digitales" disponible en <u>http://gtas.unican.es/docencia/cd</u>.

[6] O. Fernández, "Caracterización Experimental y Modelado de Canal MIMO para aplicaciones WLAN y WMAN", Tesis Doctoral, Ingeniería de Comunicaciones, Universidad de Cantabria, Mayo 2007.

[7] S. Hu, F. Rusek, "Modulus Zero-Forcing Detection for MIMO Channels", Enero 201.

[8] 3GPP "Spatial channel model for multiple input multiple output (MIMO) simulations", TR 25.996, v6.1.0, Diciembre 2003, disponible en https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/25_series/25.996/.

[9] W. Mohr, "The WINNER (wireless world initiative new radio) project development of a radio interface for systems beyond 3G", Septiembre 2005, en IEEE 16th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, Berlin, 2005, pp. 857-862 Vol. 2, doi: <u>10.1109/PIMRC.2005.1651564</u>.

[10] "Measurement Campaigns and Initial Channel Models for Preferred Suitable Frequency Ranges", European Project Millimetre-Wave Based Mobile Radio Access Network for Fifth Generation Integrated Communications (mmMAGIC), Marzo 2016, disponible en: <u>https://5g-mmmagic.eu/</u>.

[11] G. Institutes, Telecommunications, Glossary of Telecommunication Terms, Federal Standard 1037C, Febrero, 1997.

[12] R.P. T. L. R. J. B. M. D. V. M. R.-P. J. R. P. J. R. Pérez, «Empirical Characterization of the Indoor Radio Channel for Array,» IEEE, vol. 7, pp. 94725-94736, Julio 2019.

[13] R.P. Shinsuke Hara, Multicarrier Techniques for 4G Mobile Communications, Artech House, 2003.

[14] R. P. T. M. D. L. V. a. J. B. J. R. Pérez, «Analysis of Massive MIMO Performance in an Indoor Picocell With High Number of Users,» IEEE Access, vol. 8, pp. 107025-107034, Junio 2020.

[15] A. Rodriguez, "Analysis of the indoor radio channel for 5G systems: broadband parameters and spectral efficiency", Julio 2020.