

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE  
INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE  
TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



***Trabajo Fin de Grado***

**Análisis del fenómeno de Hardening en  
sistemas MIMO masivo Concentrado y  
Distribuido en la banda de 26 GHz**  
(Analysis of the Hardening Phenomenon  
in Concentrated and Distributed Massive  
MIMO Systems in the 26 GHz Band)

*Para acceder al Título de*

***Graduado en***

***Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicación***

Autor: Edgar Mora Herrero

Febrero - 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:** Edgar Mora Herrero

**Director del TFG:** Rafael Pedro Torres Jiménez

**Título:** “Análisis del fenómeno de Hardening en sistemas MIMO masivo  
Concentrado y Distribuido en la banda de 26 GHz”

**Title:** “Analysis of the Hardening Phenomenon in Concentrated and Distributed  
Massive MIMO Systems in the 26 GHz Band “

**Presentado a examen el día:** 05 de febrero 2024

para acceder al Título de

**GRADUADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS DE  
TELECOMUNICACIÓN**

Composición del Tribunal:

Presidente (Apellidos, Nombre): Villar Bonet, Eugenio

Secretario (Apellidos, Nombre): Pérez López, Jesús  
Ramón

Vocal (Apellidos, Nombre): Crespo Fidalgo, José Luis

Este Tribunal ha resuelto otorgar la calificación de: .....

Fdo.: El Presidente

Fdo.: El Secretario

Fdo.: El Vocal

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

Vº Bº del Subdirector

Trabajo Fin de  
Grado Nº  
(a asignar por Secretaría)



# ÍNDICE

<b>CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN</b> .....	9
1.1 CONTEXTO GENERAL DE LAS COMUNICACIONES INALÁMBRICAS	10
1.2 EVOLUCIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS 5G .....	11
1.3 OBJETIVOS .....	14
1.4 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO .....	15
<b>CAPÍTULO II: MIMO MASIVO</b> .....	16
2.1 INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS MIMO .....	17
2.2 INTRODUCCIÓN AL CONCEPTO SDMA .....	18
2.3 MIMO MASIVO .....	20
2.4 Matriz de canal .....	23
2.5 IMPORTANCIA DEL “CHANNEL HARDENING” EN MIMO .....	25
2.6 INCOVENIENTES SISTEMAS MIMO .....	28
<b>CAPÍTULO III: COMPARACIÓN SISTEMA CONCENTRADO Y DISTRIBUIDO</b> ....	29
3.1 MIMO CONCENTRADO .....	30
3.2 MIMO DISTRIBUIDO .....	30
3.3 SISTEMAS CELL-FREE .....	31
3.4 COMPARACIÓN ENTRE DE LOS SISTEMAS DISTRIBUIDO Y CONCENTRADO .....	32
<b>CAPÍTULO IV: ANÁLISIS MEDIANTE SIMULACIÓN DEL HARDENING</b> .....	34
4.1 ENTORNO DE SIMULACIÓN .....	35
4.2 SIMULACIÓN MEDIANTE TRAZADO DE RAYOS: CINDOOR .....	37
4.2.1 Parámetros básicos CINDOOR .....	38
4.2.2 MIMO concentrado .....	40
4.2.3 MIMO distribuido .....	40
4.2 ANÁLISIS DEL HARDENING .....	41
<b>CAPÍTULO V: RESULTADOS</b> .....	44
5.1 EXPLICACIÓN RESULTADOS .....	45
5.2 RESULTADOS MIMO MASIVO CONCENTRADO .....	46
5.2.1 Ganancia .....	46
5.2.2 Desviación típica .....	48
5.3 RESULTADOS MIMO MASIVO DISTRIBUIDO .....	53
5.3.1 Ganancia .....	53
5.3.2 Desviación típica .....	54

<b>5.4 COMPARACIÓN ESPACIO VS FRECUENCIA .....</b>	<b>58</b>
<b>5.4.1 MIMO concentrado.....</b>	<b>59</b>
<b>5.4.1 MIMO distribuido .....</b>	<b>60</b>
<b>CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES.....</b>	<b>62</b>

# Índice de Figuras

<b>Figura 1.</b> Evolución de las comunicaciones móviles desde el 1G hasta el 5G [3]..	12
<b>Figura 2.</b> Posibilidades de utilización del 5G [5].....	13
<b>Figura 3.</b> Operación de enlace descendente en un enlace MIMO. ....	18
<b>Figura 4.</b> Sistema SDMA.....	19
<b>Figura 5.</b> Ganancia del canal en función del número de antenas activas. [10].....	27
<b>Figura 6.</b> Formación haces y multiplexación espacial.....	22
<b>Figura 7.</b> Caracterización canal MIMO [12].....	24
<b>Figura 8.</b> Diseño de dos tipos de MIMO masivo. (a) MIMO concentrado. (b) MIMO distribuido. ....	32
<b>Figura 9.</b> Vista planta 0 de la ETSIIT [14].....	35
<b>Figura 10.</b> Hall planta 0 de la ETSIIT [15] .....	36
<b>Figura 11.</b> Pasillo planta 0 de la ETSIIT [15].....	36
<b>Figura 12.</b> Modelo de la planta 0 de la ETSIIT utilizado en CINDOOR [15] .....	37
<b>Figura 13.</b> Posición de los transmisores en CINDOOR .....	38
<b>Figura 14.</b> Posición de las antenas para el sistema MIMO distribuido en CINDOOR [15].....	402
<b>Figura 15.</b> Antena HyperLink HG35805CUPR-NF .....	413
<b>Figura 16.</b> Vista de transmisores y receptores para ambos sistemas MIMO en CINDOOR [8].....	403
<b>Figura 17.</b> Vista de transmisores y receptores para ambos sistemas MIMO en CINDOOR [15].....	46
<b>Figura 18.</b> Comparación de la ganancia en el canal para el transmisor 1 en función del número de antenas activas en el sistema concentrado.....	47
<b>Figura 19.</b> Desviación típica del canal para MIMO masivo concentrado .....	48
<b>Figura 20.</b> Comparación desviación típica para los transmisores 1 y 5 en el dominio del espacio y la frecuencia para el sistema concentrado .....	50
<b>Figura 21.</b> Comparación desviación típica para los transmisores 7 y 8 en el dominio del espacio y la frecuencia para el sistema concentrado .....	51
<b>Figura 22.</b> Comparación de la ganancia en el canal para el transmisor 1 en función del número de antenas activas en el sistema distribuido .....	53
<b>Figura 23.</b> Desviación típica del canal para MIMO masivo distribuido .....	54
<b>Figura 24.</b> Comparación desviación típica para los transmisores 1 y 5 en el dominio del espacio y la frecuencia para el sistema distribuido .....	56

<b>Figura 25.</b> Comparación desviación típica para los transmisores 7 y 8 en el dominio del espacio y la frecuencia para el sistema distribuido .....	57
<b>Figura 26.</b> Desviación típica del canal para MIMO masivo concentrado en función de la frecuencia a 26 GHz .....	59
<b>Figura 27.</b> Desviación típica del canal para MIMO masivo concentrado en función de la frecuencia a 26 GHz .....	60

## ÍNDICE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Coordenadas para la posición de los transmisores .....	39
<b>Tabla 2.</b> Comparación desviación típica para cada transmisor y distinto número de antenas activas para el sistema concentrado.....	49
<b>Tabla 3.</b> Comparación desviación típica para los transmisores 1 y 5 en el dominio del espacio y la frecuencia y distinto número de antenas activas para el sistema concentrado .....	50
<b>Tabla 4.</b> Comparación desviación típica para los transmisores 1 y 5 en el dominio del espacio y la frecuencia y distinto número de antenas activas para el sistema concentrado .....	52
<b>Tabla 5.</b> Comparación desviación típica para cada transmisor y distinto número de antenas activas para el sistema concentrado.....	55
<b>Tabla 6.</b> Comparación desviación típica para los transmisores 1 y 5 en el dominio del espacio y la frecuencia y distinto número de antenas activas para el sistema distribuido .....	56
<b>Tabla 7.</b> Comparación desviación típica para los transmisores 7 y 8 en el dominio del espacio y la frecuencia y distinto número de antenas activas para el sistema distribuido .....	58
<b>Tabla 8.</b> Comparación de la desviación los ambos sistemas con 100 antenas activas en la medida de la frecuencia a 26 GHz.....	61

# **CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN**

## **1.1 CONTEXTO GENERAL DE LAS COMUNICACIONES INALÁMBRICAS**

En el siglo XXI, las comunicaciones inalámbricas han evolucionado de manera impresionante, desempeñando un papel fundamental en la conectividad global. Estas tecnologías permiten la transmisión de datos, voz y multimedia a través del aire, eliminando la necesidad de conexiones físicas y expandiendo las fronteras de la conectividad. Desde la telefonía móvil hasta la transmisión de datos en Internet, las comunicaciones inalámbricas son una parte esencial de la vida cotidiana de las personas y una columna vertebral de la infraestructura moderna.

Con la creciente demanda de dispositivos inteligentes, la expansión de las redes móviles de alta velocidad y la proliferación de aplicaciones que requieren ancho de banda, las expectativas de las comunicaciones inalámbricas son cada vez más altas. Los usuarios esperan conexiones más rápidas y confiables, independientemente de su ubicación. Este aumento en la demanda ha impulsado la investigación y el desarrollo en el campo de las telecomunicaciones para encontrar soluciones que puedan satisfacer estas necesidades crecientes.

En este contexto, las tecnologías MIMO (Multiple-Input, Multiple-Output) desempeña un papel crucial al abordar los desafíos de mejorar la eficiencia espectral y la confiabilidad de las comunicaciones inalámbricas. Este concepto está en el centro de la innovación en telecomunicaciones, ya que permite una transmisión de datos más rápida y eficiente, lo que a su vez tiene un impacto directo en la experiencia del usuario y en la capacidad de las redes para satisfacer la creciente demanda de conectividad [1].

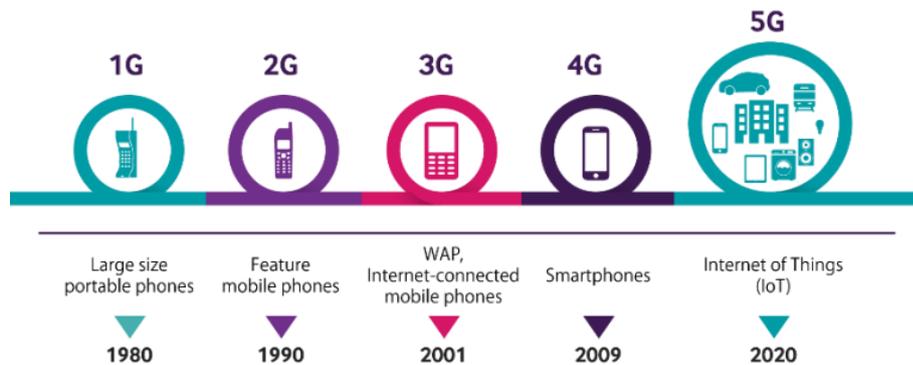
## 1.2 EVOLUCIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS 5G

La evolución de los sistemas de comunicación móvil ha sido muy rápida desde finales del siglo pasado a la actualidad, (en apenas 30 años), ha llevado a la creación de la tecnología 5G, la quinta generación de redes inalámbricas. A medida que avanzamos en esta era digital, es fundamental comprender cómo ha evolucionado la 5G y cuáles son sus características distintivas [2].

Desde el inicio de la telefonía móvil, hemos visto una progresión abusiva del adjetivo impresionante a través de diversas generaciones de tecnología de comunicación móvil:

1. 1G (Primera Generación): Introducida a principios de la década de 1980, permitió la comunicación de voz analógica a través de redes celulares.
2. 2G (Segunda Generación): A mediados de la década de 1990, 2G introdujo la comunicación digital y la mensajería de texto.
3. 3G (Tercera Generación): A principios de la década de 2000, 3G proporcionaba velocidades de datos más rápidas y servicios de datos como el correo electrónico y la navegación web básica.
4. 4G (Cuarta Generación): A mediados de la década de 2000, 4G ofrecía velocidades de datos mucho más rápidas, lo que permitía la transmisión de vídeo en tiempo real y aplicaciones de alta demanda de datos.
5. 5G (Quinta Generación): La quinta generación, o 5G, es la última evolución en este camino, y ha llegado con una serie de características revolucionarias.

## THE EVOLUTION OF MOBILE COMMUNICATIONS FROM 1G TO 5G



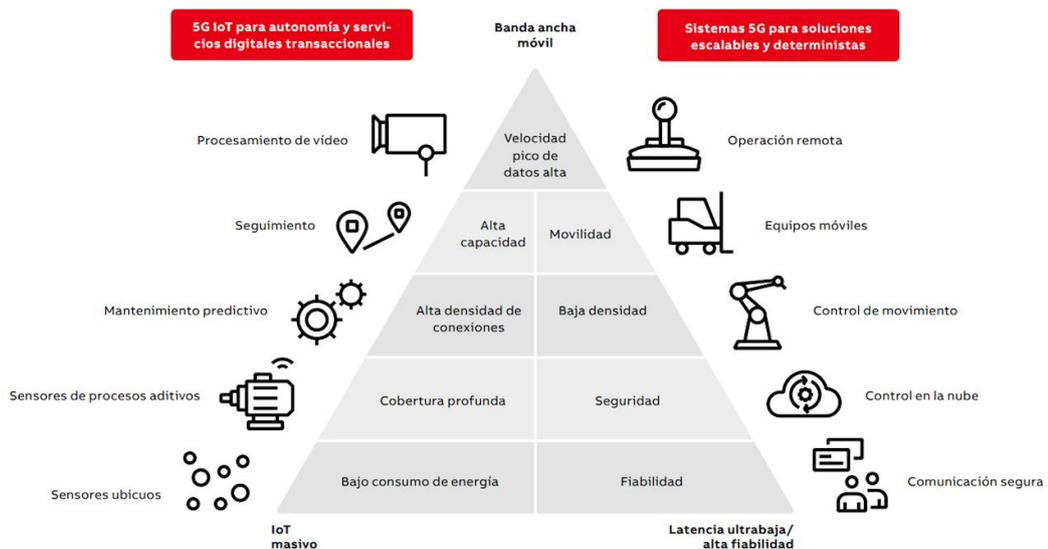
**Figura 1.** Evolución de las comunicaciones móviles desde el 1G hasta el 5G [3]

Las características más destacadas de los sistemas 5G son las siguientes [4]:

- **Mayor Velocidad:** 5G ofrece velocidades de datos significativamente más rápidas que las generaciones anteriores. Esto permite descargas más rápidas y una experiencia de usuario más fluida al transmitir contenido multimedia y utilizar aplicaciones en línea.
- **Baja Latencia:** La latencia extremadamente baja de 5G, a menudo inferior a 1 milisegundo, permite aplicaciones en tiempo real, como la realidad virtual, la telemedicina y la automatización industrial. Esto es fundamental para tareas que requieren respuestas inmediatas.
- **Mayor Capacidad:** Las redes 5G tienen una capacidad significativamente mayor para manejar una gran cantidad de dispositivos conectados simultáneamente. Esto es esencial a medida que aumenta la cantidad de dispositivos IoT y la demanda de conectividad de alta densidad en áreas urbanas.
- **Eficiencia Energética:** 5G incorpora tecnologías que reducen el consumo de energía, tanto en los dispositivos móviles como en la infraestructura de red. Esto se traduce en una mayor duración de la batería de los dispositivos y una menor huella ambiental.
- **Diversidad de Frecuencias:** 5G utiliza una amplia gama de frecuencias, desde las bandas de baja frecuencia hasta las ondas milimétricas

(mmWave) de alta frecuencia. Esta diversidad de espectro permite un mayor ancho de banda y velocidades de transmisión más altas.

- **Virtualización de Red:** La virtualización de funciones de red (NFV) es una característica clave de 5G, que permite una gestión más flexible y eficiente de los recursos de red. Esto facilita la implementación de servicios personalizados y escalables.
- **Mayor Seguridad:** La seguridad es una prioridad en las redes 5G, con características avanzadas de cifrado y autenticación para proteger las comunicaciones y los datos de los usuarios.
- **Aplicaciones Innovadoras:** La velocidad y la baja latencia de 5G abren la puerta a una amplia gama de aplicaciones innovadoras. Estos incluyen la automatización industrial, la atención médica remota, la transmisión de video en alta definición en tiempo real y la conectividad de dispositivos IoT de próxima generación.
- **Despliegue de Redes Heterogéneas:** 5G se basa en una combinación de redes, que incluye macro celdas, micro celdas y estaciones base pequeñas, para proporcionar una cobertura y capacidad consistentes en áreas urbanas y rurales.



**Figura 2.** Posibilidades de utilización del 5G [5]

En resumen, la evolución hacia 5G representa un salto significativo en las comunicaciones móviles, ofreciendo una conectividad más rápida y confiable que promete transformar la forma en que interactuamos con la tecnología. Esto abrirá nuevas puertas para aplicaciones y servicios avanzados, además de respaldar la creciente demanda de una sociedad cada vez más conectada.

### **1.3 OBJETIVOS**

La tecnología MIMO desempeña un papel fundamental en la evolución de los sistemas de comunicaciones, y en particular, el MIMO masivo se destaca como una tecnología clave que contribuirá significativamente a cumplir los objetivos establecidos para las conexiones 5G y 6G.

Por este motivo, y debido a las numerosas ventajas que presenta en comparación con tecnologías más convencionales utilizadas en generaciones anteriores, mi Trabajo de Fin de Grado (TFG) se enfocará en esta tecnología emergente.

En términos más específicos, el propósito principal de mi TFG consiste en analizar el efecto del "hardening" en sistema MIMO en la banda de 26 GHz, Inicialmente se obtienen las matrices de canal MIMO mediante simulación con trazado de rayos, y posteriormente se procesan los resultados de simulaciones realizadas en entornos interiores para canales MIMO Concentrado y MIMO Distribuido. Luego, se compararán estos resultados utilizando diferentes números de usuarios activos y en movimiento para comprobar cómo influye el fenómeno del "channel hardening" en la ganancia de canal. Para llevar a cabo esta investigación, utilizaré la herramienta CINDOOR, que se basa en el trazado de rayos, para caracterizar los canales MIMO masivos. Posteriormente, se empleará el software MATLAB para procesar los resultados obtenidos y presentarlos en forma de gráficos. El enfoque principal de este estudio se centrará en comparar la ganancia y la desviación típica en el canal para distinto número de antenas en el dominio

del espacio, por lo que se usará un array de puntos con el cuál simular el movimiento de un dispositivo móvil, y la frecuencia de funcionamiento se establecerá en la banda de los 26 GHz. También se van a comparar los resultados obtenidos en el dominio del espacio con los resultados obtenidos en el dominio de la frecuencia.

## **1.4 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO**

La estructura que se va a llevar a cabo en este documento va a constar de 6 capítulos diferentes. El presente capítulo, se dedica a una introducción del trabajo presentado.

El segundo capítulo trata sobre el MIMO Masivo, presentando lo que es y sus características principales. También se va a exponer su evolución desde el MIMO hasta el MIMO Masivo, el efecto “hardening” y su explicación, y una introducción al concepto de Acceso Múltiple por División Espacial (SDMA, por sus siglas en inglés, "Spatial Division Multiple Access").

En el tercer capítulo se va a exponer las diferencias entre el MIMO Masivo concentrado y el distribuido, sus ventajas e inconvenientes y una explicación de cada uno de los sistemas.

El cuarto capítulo trata sobre el entorno donde se ha realizado la simulación, los parámetros utilizados, el programa CINDOOR y su funcionamiento con el trazado de rayos, Matlab con su desarrollo para el procesado del canal con el cual obtener los resultados de la ganancia de canal y de la desviación típica de ésta.

En el quinto capítulo se comentan los resultados obtenidos y se comparan con resultados obtenidos en función de la frecuencia, donde veremos comportamientos parecidos.

Por último, en el sexto capítulo, se presentan las conclusiones sobre los resultados obtenidos.

## **CAPÍTULO II: MIMO MASIVO**

En este segundo capítulo se va a presentar lo relacionado con la tecnología MIMO. El capítulo va a constar de una introducción para poner en contexto esta tecnología, la técnica SDMA y sus características, la importancia que tiene el "channel hardening" y sus fundamentos. También se va a comentar en que consiste el MIMO Masivo en comparación del MIMO clásico, la definición del Beamforming y alguno de los inconvenientes de la tecnología.

## 2.1 INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS MIMO

En el ámbito de las comunicaciones inalámbricas, el término "MIMO" hace referencia a "Multiple-Input, Multiple-Output", que en español se traduce como "Múltiples Entradas, Múltiples Salidas". Los sistemas MIMO representan una evolución significativa en la forma en que se transmiten y reciben datos a través de canales inalámbricos y han revolucionado la industria de las telecomunicaciones.

Un sistema MIMO clásico se caracteriza por el uso de múltiples antenas tanto en la estación base como en los dispositivos móviles. Esto permite que el sistema aproveche los múltiples canales de propagación de la señal inalámbrica y las múltiples dimensiones del espacio para mejorar la calidad de la comunicación. En lugar de depender de una única antena de transmisión y una única antena de recepción, como en los sistemas SISO (Single-Input, Single-Output), los sistemas MIMO pueden utilizar varias antenas para transmitir y recibir datos de manera simultánea.

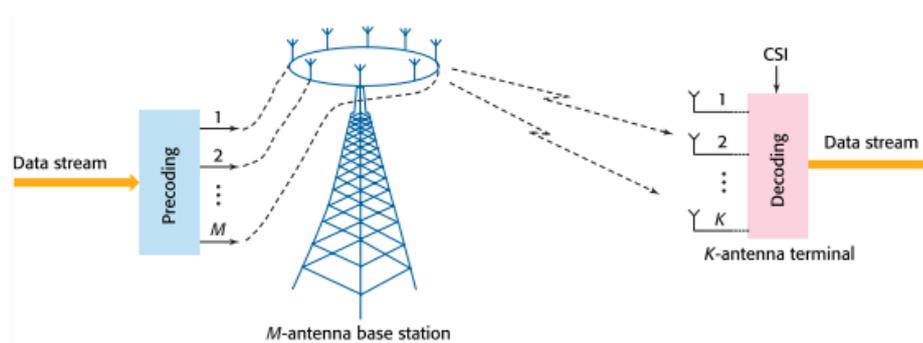
Las ventajas clave de los sistemas MIMO incluyen [7]:

- Mejora del rendimiento: Al aprovechar los múltiples canales de propagación de la señal, los sistemas MIMO pueden aumentar la capacidad del canal y por lo tanto la velocidad de transmisión.
- Aumento de la confiabilidad: La diversidad espacial en los sistemas MIMO reduce la probabilidad de pérdida de señal debido a obstáculos

y a los desvanecimientos, característicos de los sistemas inalámbricos, lo que mejora la confiabilidad de la comunicación.

- Reducción de la interferencia: Los sistemas MIMO pueden mitigar las interferencias al enfocarse en las direcciones de las señales deseadas y reducir la recepción de señales no deseadas.
- Mayor eficiencia espectral: Los sistemas MIMO permiten transmitir varios flujos de datos en paralelo en el mismo ancho de banda y simultáneamente, lo que aumenta la eficiencia espectral y la capacidad de la red.

Estos beneficios hacen que los sistemas MIMO sean fundamentales en tecnologías de comunicación inalámbrica avanzadas, como el estándar 4G LTE y 5G, así como en aplicaciones de alta velocidad, como la transmisión de video en alta definición y la comunicación en tiempo real.



**Figura 3.** Operación de enlace descendente en un enlace MIMO.

## 2.2 INTRODUCCIÓN AL CONCEPTO SDMA

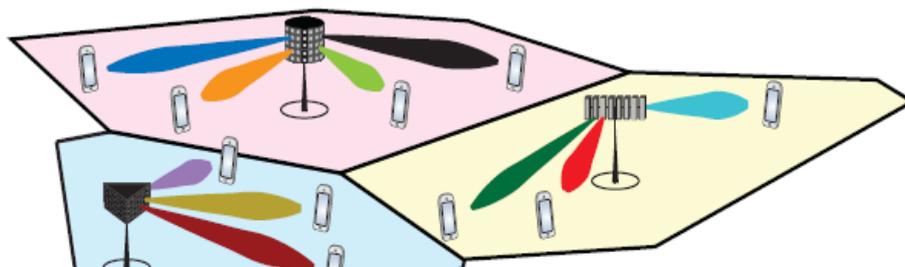
El Acceso Múltiple por División Espacial (SDMA) es una técnica de multiplexión utilizada en algunas redes de comunicación inalámbricas, para mejorar la capacidad y eficiencia de la transmisión de datos.

El método SDMA se basa en la idea de que, en un entorno de comunicación inalámbrica, las señales transmitidas pueden ser enfocadas hacia los dispositivos receptores individuales o grupos de dispositivos en lugar de ser transmitidas de manera indiscriminada en todas las direcciones. Esto

se logra a través de la manipulación de las propiedades espaciales de la señal, como su dirección y orientación.

Las características claves del SDMA incluyen [8]:

- **Focalización espacial de la Transmisión:** En lugar de transmitir la señal de manera omnidireccional, el SDMA permite que una estación base o un transmisor inalámbrico dirija de manera selectiva las señales hacia dispositivos receptores específicos, lo que reduce la interferencia y mejora la eficiencia de la comunicación.
- **Antenas Inteligentes:** El SDMA se implementa utilizando antenas inteligentes que pueden enfocar y dirigir las señales hacia dispositivos receptores individuales en función de su ubicación y dirección.
- **Aumento de la Capacidad:** Al permitir la comunicación simultánea y enfocada hacia múltiples dispositivos, el SDMA aumenta la capacidad total de la red, lo que significa que más dispositivos pueden comunicarse de manera efectiva al mismo tiempo sin degradar el rendimiento, compartiendo los recursos en tiempo y en frecuencia.
- **Reducción de interferencias:** Al dirigir las señales de manera selectiva hacia los dispositivos receptores deseados, se reduce la interferencia de otras señales procedentes de otros usuarios, lo que mejora la calidad de la comunicación y la velocidad de transferencia de datos.
- **Uso Eficiente del Espectro:** El SDMA ayuda a aprovechar de manera más eficiente el espectro de frecuencia disponible, lo que es fundamental en redes inalámbricas donde el espectro es un recurso limitado y valioso.



**Figura 4.** Sistema SDMA

El SDMA se utiliza en diversas aplicaciones, incluyendo redes celulares avanzadas, sistemas de comunicación por satélite y tecnologías de redes locales inalámbricas (como el estándar Wi-Fi 6E). Esta técnica se ha vuelto especialmente importante a medida que aumenta la densidad de dispositivos conectados y la demanda de conectividad de alta velocidad en entornos urbanos y empresariales. En resumen, el SDMA es una estrategia clave para mejorar la eficiencia y la capacidad de las redes inalámbricas al permitir una transmisión de datos más enfocada y direccional.

## 2.3 MIMO MASIVO

MIMO Masivo supera la limitación de escalabilidad de manera peculiar: en lugar de esforzarse por alcanzar el límite de Shannon en su totalidad, lo logra incrementando el tamaño del sistema, lo cual resulta paradójico. Se diferencia de la práctica teórica de Shannon de tres maneras fundamentales. En primer lugar, solamente la estación base adquiere conocimiento del canal de enlace ascendente. En un sistema TDD, el tiempo necesario para obtener la información del canal (CSI) es independiente del número de antenas de la estación base. En segundo lugar, el número de antenas en la estación base se incrementa significativamente en comparación con el número de usuarios, esto es  $M \gg Q$ , condición que define propiamente al MIMO masivo. Tercero, se emplea una técnica de multiplexación que utiliza pre-codificación lineal simple en el enlace descendente, acompañado de una decodificación lineal en el enlace ascendente. Conforme aumenta el número de antenas en la estación base, el rendimiento de la pre-codificación y decodificación lineal puede acercarse al límite de Shannon.

Gracias al sistema MIMO Masivo, se ha podido obtener una mayor robustez en el sistema completo, ya que, debido al gran número de antenas, si una de estas fallase el impacto producido en el sistema se ve enormemente reducido. Además, el nivel de potencia necesario en los transmisores se ve también reducido, lo que supone un gran ahorro de procesamiento de señal, lo

que se traduce en un ahorro de batería. También gracias a este sistema, tenemos una cobertura más homogénea en toda la superficie de la celda donde se encuentre el transmisor [10].

La multiplexación espacial en sistemas MIMO es una técnica avanzada en las comunicaciones inalámbricas que aprovecha múltiples antenas tanto en las estaciones base como en los dispositivos de usuario para mejorar la capacidad y el rendimiento de las transmisiones. En lugar de depender de una sola señal, la multiplexación espacial permite transmitir múltiples flujos de datos simultáneamente a través de diferentes caminos de comunicación, lo que aumenta la eficiencia y la velocidad de transmisión. Podemos afirmar que los sistemas MIMO masivo son una tecnología que permite implementar el método de acceso múltiple SDMA de forma muy eficiente y relativamente sencilla.

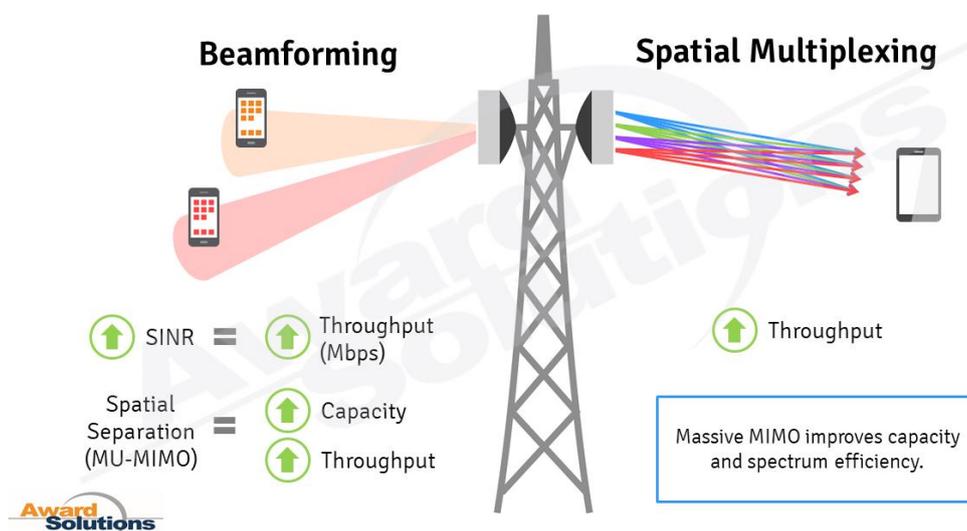
Cada antena en el sistema MIMO representa un camino independiente para la transmisión y recepción de datos. Esto significa que, en lugar de enviar un solo flujo de datos a la vez, el sistema puede transmitir varios flujos en paralelo. Para lograr esto, se utilizan técnicas de precodificación en la estación base y técnicas de decodificación en el dispositivo de usuario para separar y recuperar los flujos de datos transmitidos simultáneamente.

La multiplexación espacial no solo aumenta la capacidad del sistema, sino que también mejora la calidad de la comunicación. Al transmitir datos a través de múltiples caminos, se reducen los efectos de la interferencia y el desvanecimiento de la señal, lo que conduce a una comunicación más confiable y de mayor calidad [11].

Esta técnica se ha convertido en una parte fundamental de los estándares de comunicación inalámbrica modernos, como 4G LTE, 5G y Wi-Fi, y se utiliza en una amplia variedad de aplicaciones, desde la transmisión de datos de alta velocidad hasta la comunicación en dispositivos IoT y la transmisión de vídeo de alta definición. En resumen, la multiplexación espacial en sistemas MIMO es una técnica clave para mejorar el rendimiento y la eficiencia de las comunicaciones inalámbricas.

Otras de las características de los sistemas MIMO masivo es que se realiza el beamforming con un procesado de la señal relativamente sencillo. Este "beamforming" en sistemas MIMO Masivo se refiere a una técnica que se utiliza para enfocar o dirigir de manera selectiva la energía de transmisión de las antenas hacia una dirección específica en el espacio, lo que permite mejorar la eficiencia y el rendimiento de la comunicación inalámbrica. Esta técnica es especialmente útil en sistemas MIMO, donde hay múltiples antenas tanto en la estación base como en el dispositivo de usuario.

El objetivo principal del beamforming es mejorar la calidad de la señal en la dirección deseada y reducir la interferencia en otras direcciones. En lugar de radiar la señal de manera uniforme en todas las direcciones, el beamforming permite concentrar la energía de transmisión en un haz direccional, lo que aumenta la intensidad de la señal en esa dirección y, por lo tanto, mejora la calidad de la comunicación. en esa dirección [11].



**Figura 5.** Formación haces y multiplexación espacial

El beamforming se utiliza tanto en el lado de la estación base como en el lado del dispositivo de usuario. En el lado de la estación base, se ajustan las señales transmitidas por sus antenas para que se sumen

constructivamente en la dirección del dispositivo de usuario. En el lado del dispositivo de usuario, se ajustan las antenas para recibir la señal de la estación base de manera óptima.

Esta técnica es especialmente útil en entornos de comunicación inalámbrica con múltiples usuarios y condiciones de canal variables, ya que permite adaptarse dinámicamente a las condiciones del entorno y mejorar la calidad de la señal recibida. En resumen, el beamforming en sistemas MIMO es una técnica clave que permite una comunicación inalámbrica más eficiente y confiable al dirigir la energía de transmisión de manera selectiva.

## **2.4 Matriz de canal**

Una matriz de canal, en el contexto de los sistemas MIMO masivos, es una herramienta matemática que se utiliza para describir las relaciones entre múltiples antenas en la estación y las antenas en los dispositivos finales en un entorno de comunicación inalámbrica. Esta matriz es esencial para comprender y optimizar la comunicación en un sistema MIMO masivo.

La matriz de canal se representa generalmente como una matriz  $H$ , donde cada entrada  $G(M_a, i)$  representa la ganancia o atenuación de la señal que viaja desde la antena  $M_a$  en la estación base hacia la antena  $i$  en el dispositivo final. Cada elemento de la matriz de canal depende de la distancia, la dirección y las condiciones del canal inalámbrico en ese punto específico. En nuestro caso, " $M_a$ " es el número de antenas activas e " $i$ " es la posición en la que se encuentra el dispositivo móvil.

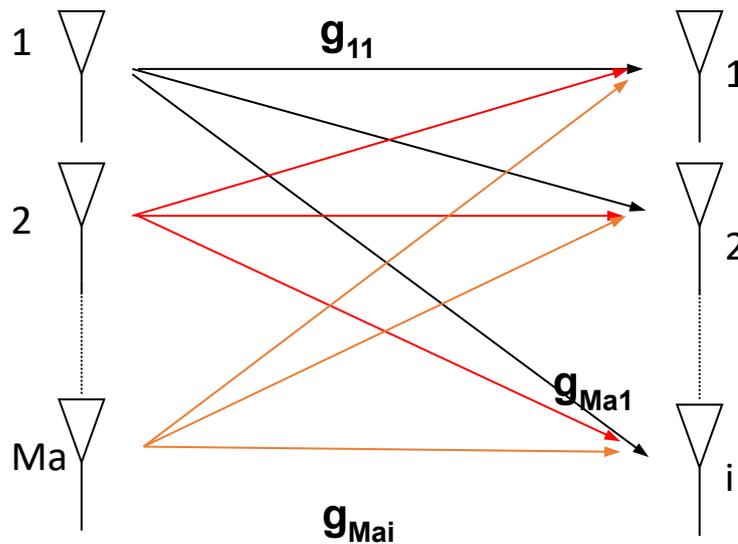


Figura 6. Caracterización canal MIMO [12]

$$G[M_a, i] = \begin{pmatrix} g_{1,1} & \cdots & g_{1,20} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{M_a,1} & \cdots & g_{M_a,20} \end{pmatrix}$$

En un sistema MIMO masivo, la matriz de canal suele ser de gran tamaño debido al gran número de antenas involucradas. Esto significa que  $G$  es una matriz grande con muchas filas y columnas. La matriz de canal puede cambiar con el tiempo debido a la variabilidad del canal inalámbrico, como la interferencia, el desvanecimiento de la señal y la reflexión.

El conocimiento preciso de la matriz de canal es fundamental para la transmisión y la recepción eficientes en un sistema MIMO masivo. Con esta información, es posible diseñar esquemas de procesamiento de señales que aprovechen la diversidad espacial y la formación de haces para mejorar la calidad de la señal y la capacidad del sistema.

La estimación y seguimiento de la matriz de canal son tareas críticas en la implementación exitosa de sistemas MIMO masivos, ya que permiten ajustar la transmisión para adaptarse a las condiciones cambiantes del canal y maximizar el rendimiento de la comunicación [12].

## 2.5 IMPORTANCIA DEL “CHANNEL HARDENING” EN MIMO

Consideremos un sistema MIMO masivo (mMIMO) con M antenas en la estación base (BS) y Q usuarios con una sola antena. La matriz del canal MIMO, se denota como  $\mathbf{G}_{M \times Q}^{raw}[k]$ . El índice k hace referencia al k-ésimo tono o subportadora en el marco OFDM. Cada columna de la matriz del canal,  $\mathbf{g}_q^{raw}[k]$ , de orden  $M \times 1$ , representa el vector del canal establecido entre el q-ésimo usuario y las M antenas de la BS. Siguiendo la definición del channel hardening, podemos afirmar que el vector del canal ofrece hardening si

$$\frac{Var \{ \|\mathbf{g}_q^{raw}\|^2 \}}{E \{ \|\mathbf{g}_q^{raw}\|^2 \}^2} \rightarrow 0 \text{ si } M \rightarrow \infty \quad (2.1)$$

Dado que en los casos estudiados se considera que el canal es casi estacionario, en la ecuación anterior las operaciones  $E\{\cdot\}$  y  $Var\{\cdot\}$  se realizan exclusivamente en el dominio del espacio o de la frecuencia. La ecuación indica que, si el canal ofrece hardening, las ganancias de señal después de la codificación/precodificación experimentan cada vez menos variaciones en su nivel promedio a medida que aumenta el número de antenas en la BS; es decir, el canal se comporta asintóticamente como un canal plano de banda ancha en la frecuencia, y en un canal sin desvanecimientos en el espacio.

El nivel de hardening es una función del número de antenas en la BS. Teniendo en cuenta un número máximo de antenas M en la BS, definimos el número de antenas activas como Ma, de manera que Ma variará entre 1 y M. A partir de los canales medidos o simulados, se definen y normalizan los canales efectivos, de la siguiente manera:

$$g_q[k, Ma] = \frac{g_q^{raw}[k, Ma]}{\sqrt{\frac{1}{Ma * N_f} \sum_{k=1}^{N_f} \|g_q^{raw}[k, Ma]\|^2}} \quad (2.2)$$

$\mathbf{g}_q^{raw}[k, Ma]$  representa el vector crudo del canal del q-ésimo usuario, pero considerando solo  $Ma$  elementos, es decir, aquellos activos en la BS. Por lo tanto, el vector  $\mathbf{g}_q[k, Ma]$  es de orden  $Ma \times 1$ . Según la definición de canal activo, la potencia promedio de cada canal  $\mathbf{g}_q[k, Ma]$  es igual a 1, independientemente del número de antenas activas consideradas.

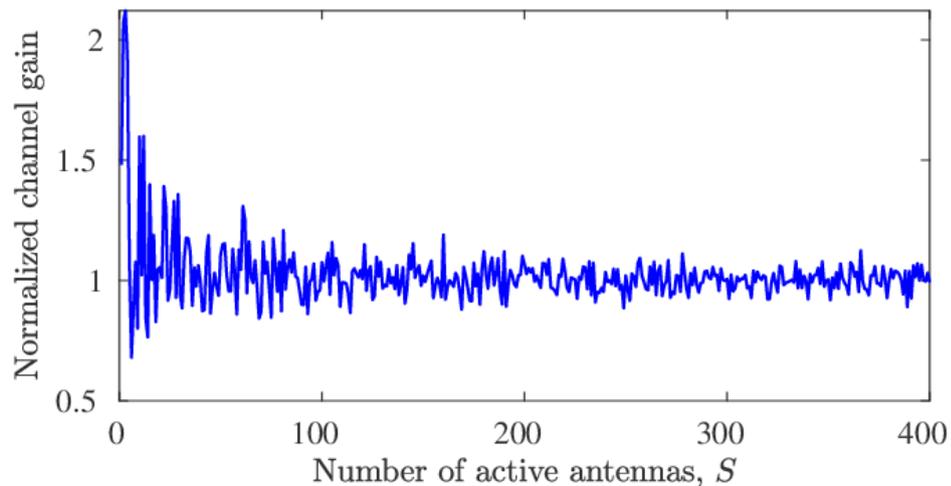
La ganancia de un canal activo para cada q-ésimo usuario se define como:

$$G_q[k, Ma] = \frac{1}{Ma} ||g_q[k, Ma]||^2 \quad (2.3)$$

Finalmente, se calcula la desviación estándar de la ganancia del canal para cada usuario y  $Ma$  antenas activas como:

$$std_q[Ma] = \sqrt{\frac{1}{N_f} \sum_{k=1}^{N_f} |G_q[k, Ma] - 1|^2} \quad (2.4)$$

Para cuantificar el nivel de endurecimiento que ofrecen los canales específicos bajo análisis, la desviación estándar de la ganancia de los canales se considerará como una métrica válida y útil [8].



**Figura 7.** Ganancia del canal en función del número de antenas activas. [10]

La importancia del "channel hardening" radica en varios aspectos clave [10]:

- Mejora de la confiabilidad: Cuando el canal se endurece, la probabilidad de que se produzcan pérdidas de señal debidas a fluctuaciones del canal disminuye considerablemente. Esto significa que las comunicaciones se vuelven más confiables y menos susceptibles a las interrupciones, lo que es esencial para aplicaciones críticas como la telemedicina, vehículos autónomos y la Internet de las cosas (IoT).
- Simplificación de la transmisión y recepción: Con el "channel hardening", la adaptación de la transmisión a las condiciones cambiantes del canal se vuelve menos necesaria, lo que simplifica la implementación de sistemas MIMO. Esto puede resultar en una reducción de la complejidad de hardware y software, lo que es beneficioso para la eficiencia y el costo de los sistemas.
- Mejora de la eficiencia espectral: La reducción de la variabilidad del canal permite una asignación más eficiente de recursos de transmisión, lo que se traduce en una mayor eficiencia espectral.

En otras palabras, se pueden transmitir más datos en el mismo ancho de banda, lo que es esencial para satisfacer la creciente demanda de conectividad.

- Aplicaciones en tecnologías avanzadas: El "channel hardening" es particularmente importante en aplicaciones 5G y más allá, donde se espera que las velocidades de transmisión sean extremadamente altas y la confiabilidad sea esencial para aplicaciones críticas. También se aplica en sistemas de comunicación masiva de máquina, como sensores IoT y comunicaciones de baja latencia.

## **2.6 INCOVENIENTES SISTEMAS MIMO**

A pesar de sus numerosas ventajas, los sistemas MIMO también pueden presentar algunos inconvenientes y desafíos. Aquí están algunos de los principales inconvenientes asociados con los sistemas MIMO:

- Requisito de Hardware Adicional: Los sistemas MIMO requieren múltiples antenas tanto en la estación base como en los dispositivos de usuario. Esto puede aumentar los costos de hardware y la complejidad en la implementación.
- Dificultad en la Implementación: La implementación efectiva de técnicas MIMO puede ser compleja y requerir un ajuste y configuración precisos para obtener el rendimiento deseado.
- Compatibilidad con Dispositivos Antiguos: La introducción de tecnologías MIMO puede plantear desafíos de compatibilidad con dispositivos más antiguos que no admiten estas tecnologías, lo que puede limitar la interoperabilidad.

## **CAPÍTULO III: COMPARACIÓN SISTEMA CONCENTRADO Y DISTRIBUIDO**

El tercer capítulo consta de una explicación para cada tipo de modelo del MIMO. Por un lado, tenemos el MIMO distribuido y por otro el MIMO concentrado. Estas tecnologías tienen ventajas distintas y es importante saberlas para ver que tecnología es mejor usar según las necesidades que haya. También se va a explicar en qué consiste la arquitectura denominada cell-free.

### **3.1 MIMO CONCENTRADO**

El MIMO masivo concentrado tiene ciertas peculiaridades frente al distribuido. El principal cambio es el posicionamiento que vamos a usar en las antenas. En este tipo de sistema, todas las antenas se ubican en la misma estación base que está asignada a cada celda. Esto conlleva que en los usuarios que se encuentren en los límites de las celdas puedan sufrir pérdidas de señal o interferencias.

Este sistema hace que las condiciones que tenemos en el canal sea prácticamente las mismas para todas las antenas, ya que están casi en el mismo punto. Al estar las antenas concentradas, los subcanales entre cada una de ellas y un usuario dado tienden a estar correlados, lo cual disminuye la capacidad de separarlos, disminuye la capacidad del canal, y por tanto la eficiencia espectral. Además, esto puede tener grandes desventajas porque si encontramos interferencias en la señal, casi seguro que vamos a tener interferencias en todas las antenas [13].

### **3.2 MIMO DISTRIBUIDO**

Los sistemas MIMO distribuidos son una evolución importante en el campo de las comunicaciones inalámbricas. En contraste con los sistemas MIMO tradicionales, que concentran múltiples antenas en una sola ubicación, los sistemas MIMO distribuidos se caracterizan por la distribución geográfica

de antenas en múltiples ubicaciones en lugar de centralizarlas en un solo punto.

Estos sistemas han encontrado aplicaciones en una variedad de contextos, incluyendo redes móviles, redes empresariales, y en situaciones de emergencia. Ofrecen ventajas como una mayor cobertura, resiliencia y redundancia, gestión mejorada de la interferencia y eficiencia espectral, lo que los hace aptos para satisfacer la creciente demanda de datos y aplicaciones en las redes de próxima generación, como 5G y más allá.

Sin embargo, también presentan desafíos en términos de coordinación de antenas, requisitos de infraestructura más complejos y la gestión de la interferencia. A pesar de estos desafíos, se espera que los sistemas MIMO distribuidos jueguen un papel clave en la evolución de las futuras redes de comunicación inalámbrica, brindando soluciones avanzadas para abordar las demandas de conectividad en un mundo cada vez más interconectado [13].

### **3.3 SISTEMAS CELL-FREE**

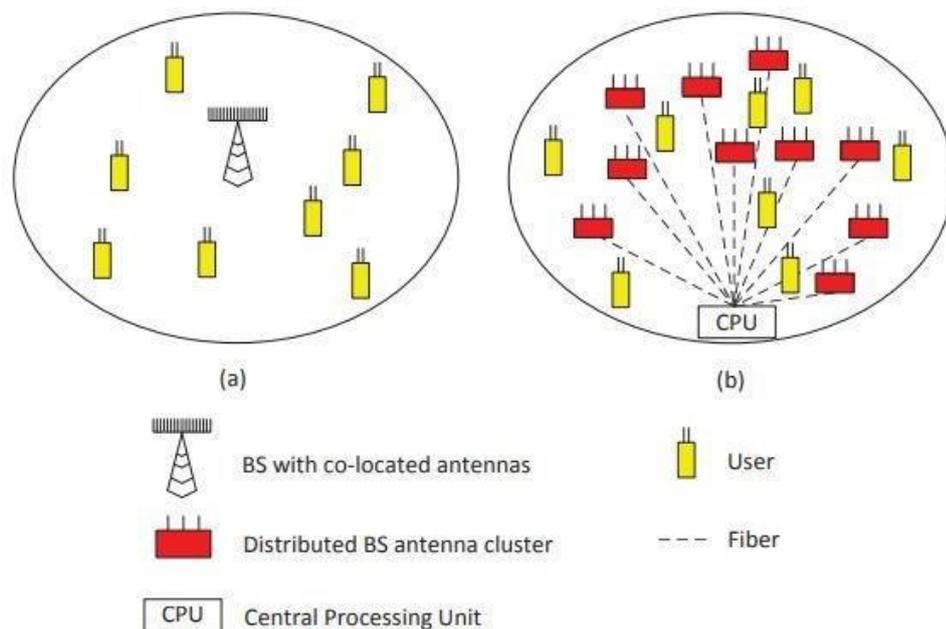
Cell-free es una innovadora arquitectura de red inalámbrica que representa una evolución significativa en comparación con las redes celulares tradicionales. Se caracteriza por la eliminación de las celdas tradicionales y la distribución descentralizada de las antenas por toda la red.

En las redes celulares convencionales, las antenas se organizan en celdas, con una estación base central en cada celda. En cambio, en un enfoque cell-free, las antenas se distribuyen en ubicaciones descentralizadas, y no hay una delimitación estricta de celdas. Esto permite una flexibilidad y escalabilidad significativas. Las antenas se instalan en lugares estratégicos, como postes, edificios, farolas o cualquier ubicación conveniente, para proporcionar cobertura en áreas específicas o densamente pobladas. La

ubicación de estas antenas puede adaptarse de manera dinámica según la demanda de tráfico y las condiciones de la red [14].

A pesar de la distribución descentralizada, las antenas en un sistema cell-free se coordinan de manera avanzada para proporcionar un rendimiento óptimo. Se utilizan algoritmos y técnicas de procesamiento de señales para coordinar transmisiones y recepciones desde múltiples antenas de manera eficiente. Además, al eliminar las restricciones de celdas y distribuir antenas en toda la red, el sistema cell-free mejora significativamente la cobertura y la capacidad de la red. Esto es especialmente beneficioso en áreas densamente pobladas, donde las celdas tradicionales pueden estar saturadas.

### 3.4 COMPARACIÓN ENTRE DE LOS SISTEMAS DISTRIBUIDO Y CONCENTRADO



**Figura 5.** Diseño de dos tipos de MIMO masivo. (a) MIMO concentrado. (b) MIMO distribuido.

En la Figura 8 podemos observar las diferencias fundamentales entre los dos sistemas. El sistema “a” es el MIMO concentrado y el sistema “b” es el MIMO distribuido.

En el sistema “a” vemos como hay distintos usuarios alrededor de la estación base que está en el centro. Esta estación está compuesta por un array de antenas muy juntas entre sí. Gracias a esta imagen se puede entender de mejor forma el hecho de que si hay problemas de canal con el usuario y una de las antenas, es altamente probable encontrar el mismo problema para el resto de las antenas.

Por otro lado, tenemos el sistema “b”, el cual vemos usuarios y antenas distribuidas por toda la zona. Esto hace que su implementación sea más complicada ya que hay que buscar un número mayor de ubicaciones donde colocar estas antenas, y sobre todo conectarlas entre sí sobre una red de fibra.

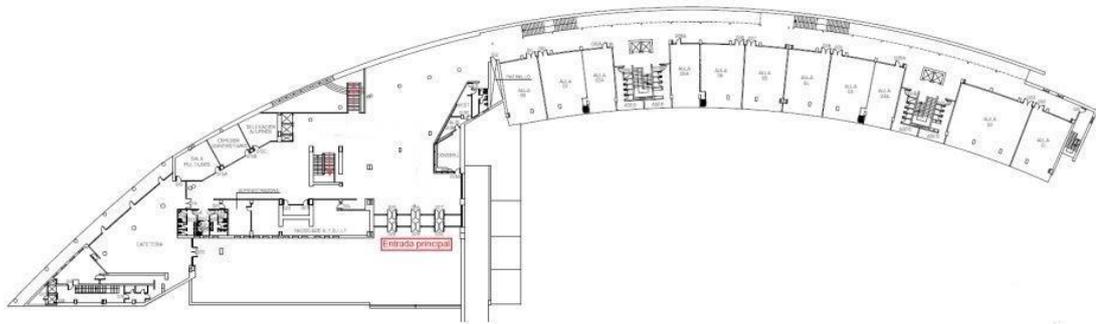
Debido a esto, en general será mejor el distribuido, pero hay que tener en cuenta el aumento de coste y si realmente merecerá la pena implementarlo u optar por el sistema concentrado.

## **CAPÍTULO IV: ANÁLISIS MEDIANTE SIMULACIÓN DEL HARDENING**

El cuarto capítulo va a tratar sobre el entorno donde se ha llevado a cabo a la simulación, los parámetros que se han utilizado en el programa CINDOOR y el desarrollo que se ha llevado con el programa Matlab, con sus ecuaciones y lógica.

## 4.1 ENTORNO DE SIMULACIÓN

La simulación se lleva a cabo en la planta 0 del edificio de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación (ETSIIT).



**Figura 6.** Vista planta 0 de la ETSIIT [14]

Esta planta consta de varias partes diferenciadas. Por un lado, tenemos en la parte izquierda la cafetería de la facultad junto a los baños y secretaría. En esta misma zona hay varias salas para distintos usos: un pequeño comedor, una sala para los delegados de los distintos grados. En la entrada podemos encontrar un amplio hall donde se encuentra consejería, un área de estudio con mesas, la escalera A desde donde poder acceder al resto de plantas de la facultad y el ascensor. En la parte derecha vamos a encontrar un largo pasillo curvado el cual da a distintas aulas en donde se imparte clase. Son un total de 8 aulas con tamaños parecidos, aunque hay 3 que tienen un tamaño menor y 1 que es más grande que el resto. En el largo pasillo encontramos también dos zonas de escaleras para acceder a las distintas plantas de la universidad ya que no todas las plantas están conectadas entre sí. La primera escalera que encontramos en el pasillo es la escalera B y la

siguiente es la escalera C. En estas zonas también encontramos ascensores y a ambos lados encontramos los baños masculinos y femeninos.



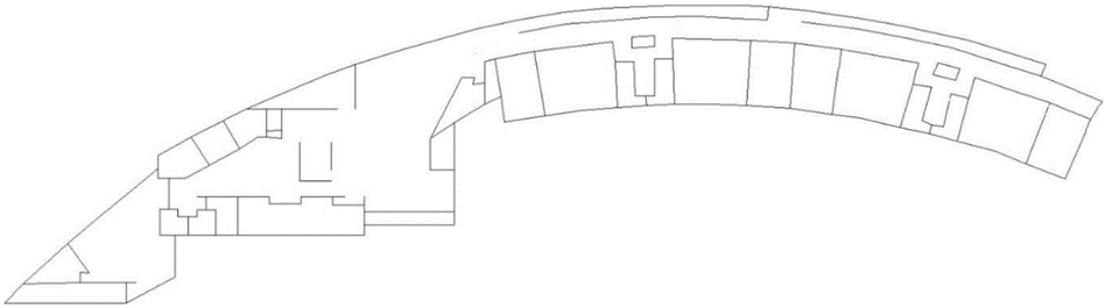
**Figura 7.** Hall planta 0 de la ETSIIT [15]



**Figura 8.** Pasillo planta 0 de la ETSIIT [15]

## 4.2 SIMULACIÓN MEDIANTE TRAZADO DE RAYOS: CINDOOR

Para realizar la simulación, se ha utilizado en el programa CINDOOR. Se ha utilizado el siguiente modelo proporcionado por el grupo GISAR de la facultad.



**Figura 9.** Modelo de la planta 0 de la ETSIT utilizado en CINDOOR [15]

Este modelo está compuesto por 180 placas, estas placas tienen distintas propiedades electromagnéticas. Estas propiedades cambian en función del material y tipo de placa. Por ejemplo, hay placas más gruesas que otras, algunas son de hormigón armado, otras de ladrillo, metal, vidrio o aluminio. Se ha trabajado a una frecuencia de 26 GHz, lo que supone que lo que contribuye a que los resultados obtenidos varíen según en la frecuencia que se trabaje.

Para saber las propiedades de cada material, se utilizan las siguientes formulas, recomendadas por la ITU en el documento [15]:

$$\eta' = a f b$$

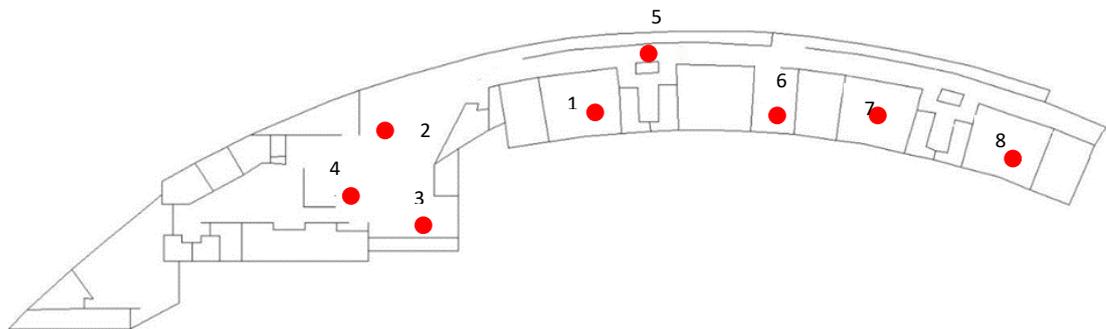
$$\sigma = c f d$$

En las fórmulas encontramos las siguientes variables:

- $\eta'$  es la permitividad relativa
- $\sigma$  es la conductividad
- $f$  es la frecuencia
- $a$  y  $b$  son constantes de cada material

#### 4.2.1 Parámetros básicos CINDOOR

Se van a exponer los parámetros utilizados en CINDOOR para llevar a cabo las simulaciones del canal Up-Link. Se ha trabajado con una frecuencia de 26 GHz. Se ha elegido esta frecuencia ya que en el estándar 5G es la que tiene más consideración para dar cobertura con un gran ancho de banda en interiores. Se han utilizado 8 ubicaciones para los transmisores, que en este caso representan a los usuarios del sistema mMIMO, que están distribuidos por toda la planta 0 del edificio de la ETSIIT. Estas ubicaciones están en aulas, pasillos y halls, para tener unos resultados en todas las condiciones posibles. En la Figura 13 se muestran las ubicaciones exactas.



**Figura 10.** Posición de los transmisores en CINDOOR

A continuación, se representan las coordenadas  $x$ ,  $y$ ,  $z$  de los 8 transmisores que vamos a simular.

Transmisores	Posición X	Posición Y	Posición Z
Tx 1	99.8	71.7	1.5
Tx 2	66.4	63.4	1.5
Tx 3	70.7	53.1	1.5
Tx 4	61.2	56.2	1.5
Tx 5	114.3	81	1.5
Tx 6	131.4	72.3	1.5
Tx 7	149	70.7	1.5
Tx 8	169.6	65.1	1.5

**Tabla 1.** Coordenadas para la posición de los transmisores

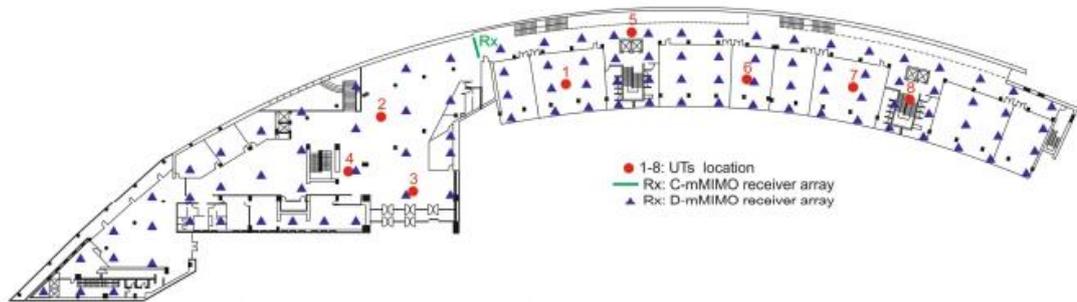
Tanto para el MIMO concentrado como para el MIMO distribuido se ha utilizado los mismos parámetros para el trazado de rayos. Se ha considerado el rayo directo, la primera difracción y las tres primeras reflexiones. Sólo se van a simular las tres primeras reflexiones porque el resto de las reflexiones no van a producir ningún cambio considerable, pero sí que aumentan considerablemente el tiempo de simulación.

Vamos a suponer un array de puntos en el transmisor para simular que éste está en movimiento y recorre un área local en el entorno de propagación, se ha considerado que el array tiene un número de veinte puntos con una separación de  $0.5\lambda$  con una inclinación de  $90^\circ$  en theta y  $0^\circ$  en phi, lo que simula que el transmisor se mueve de forma horizontal.

Cada simulación ha tenido una duración de 1.5 horas lo que ha supuesto 12 horas de simulación para el MIMO concentrado y otras 12 horas para el MIMO distribuido. La simulación nos ha devuelto un total de dos mil archivos .FAS para cada simulación en donde recogemos los datos del canal el cual se explicará más adelante como se procesan. Se obtienen dos mil archivos por cada transmisor ya que cada uno de estos está compuesto por un array de 20 puntos y para cada punto se tiene que procesar con las 100 antenas receptoras.

#### 4.2.2 MIMO concentrado

Para la tecnología de MIMO Masivo concentrado, se han utilizado las 100 antenas receptoras en un array rectangular de 10x10. Cada antena de este array está separada a una distancia de  $0.536\lambda$ . El receptor se ha colocado al principio del pasillo curvo, considerando que es un lugar céntrico al alcance de todos los transmisores. En la Figura 16 puede observarse su posición, marcada con un segmento de color verde.

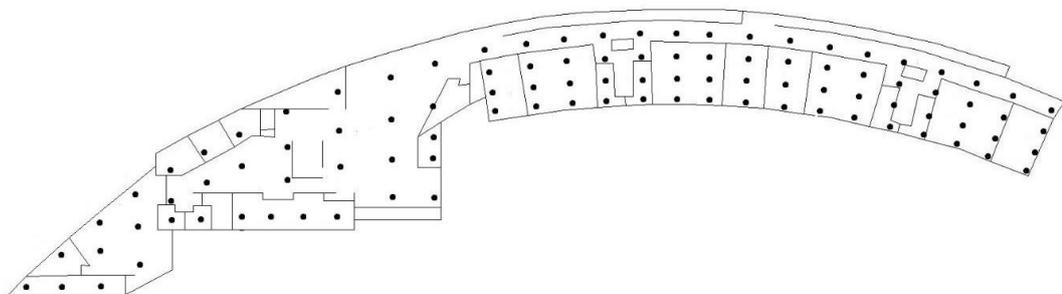


**Figura 14.** Vista de transmisores y receptores para ambos sistemas MIMO en CINDOOR [8]

En MIMO concentrado se han utilizado el tipo de antena dipolo  $\lambda/2$  tanto en el transmisor como en el receptor.

#### 4.2.3 MIMO distribuido

En esta configuración, se han considerado un total de 100 antenas a lo largo de toda la planta 0. Están colocadas de tal forma que ocupen la máxima superficie para así obtener una cobertura uniforme.



**Figura 15.** Posición de las antenas para el sistema MIMO distribuido en CINDOOR [15]

En la Figura 14, si separamos la parte izquierda de la derecha podemos comprobar que no hay el mismo número de antenas. Esto tiene un motivo, y es porque se supone que en la parte derecha va a haber un mayor número de usuarios debido a que en esa zona están las aulas donde se concentrarán los alumnos durante muchas horas. En cambio, la parte izquierda sólo tiene la cafetería que sería el único lugar donde se pueden concentrar usuarios.

La antena receptora es la HyperLink HG35805CUPR-NF, que se ha colocado a una altura de 2.8 metros, ya que la altura total del techo son 3 metros aproximadamente.



**Figura 16.** Antena HyperLink HG35805CUPR-NF

Para los usuarios se han elegido antenas del tipo dipolo  $\lambda/2$  a una altura de 1.5 metros, que es la altura media a la que estaría un dispositivo móvil en nuestras manos.

## 4.2 ANÁLISIS DEL HARDENING

MATLAB es un lenguaje de programación y entorno de desarrollo ampliamente utilizado en ingeniería, matemáticas y ciencias. Permite realizar análisis numéricos, cálculos simbólicos, visualización de datos y programación. MATLAB es conocido por su amplia variedad de herramientas y funciones predefinidas que facilitan tareas como el procesamiento de señales, la simulación, la resolución de sistemas de ecuaciones y la creación

de gráficos. Es una herramienta esencial para profesionales en campos científicos y técnicos, así como para la investigación y la educación.

En primer lugar, los archivos obtenidos por CINDOOR están compuestos por 3 columnas: la primera columna no la necesitamos para nada, la segunda es el módulo y la tercera es la fase. El módulo tenemos que pasarlo a mV ya que viene en dBmV y la fase viene en grados y se ha convertido a radianes.

$$modulo_{mv} = 10^{\frac{modulo_{dB}}{20}} \quad (4.1)$$

$$fase_{rad} = \frac{fase_{grados} * \pi}{180} \quad (4.2)$$

Una vez tenemos estos valores, lo pasamos a números complejos con la siguiente ecuación:

$$g1 = modulo_{mv} * \cos(fase_{rad}) + j * modulo_{mv} * \sin(fase_{rad}) \quad (4.3)$$

Con un bucle, se van a ir leyendo todos los archivos y de cada valor de g1 se irá almacenando en una matriz del tamaño 100x20. Una vez tenemos la matriz completa, se calcula el valor absoluto de cada elemento de la matriz. Esta matriz se denominará G[Ma,i], siendo “Ma” el número de antenas activas e “i” la posición del array.

$$G[Ma, i] = \begin{pmatrix} g_{1,1} & \cdots & g_{1,20} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{Ma,1} & \cdots & g_{Ma,20} \end{pmatrix}$$

A continuación, se ha de conseguir la norma de la matriz para que todos los valores estén. Para ello se realiza la siguiente ecuación:

$$NOR = \sqrt{\frac{1}{20} * \frac{1}{Ma} * \sum_{j=1}^{Ma} \sum_{i=1}^{20} |g_{i,j}|^2} \quad (4.4)$$

Una vez tenemos la norma de la matriz, dividimos cada elemento de la matriz  $G[Ma,i]$  entre la norma calculada. Gracias a esta operación, tenemos todos los elementos normalizados.

Para calcular la ganancia se ha de realizar la siguiente ecuación:

$$Gain[Ma, i] = \frac{1}{Ma} * \sum_{j=1}^{Ma} |\hat{g}[j, i]|^2 \quad (4.5)$$

Con esta ecuación tenemos la ganancia del canal en función del número de antenas activas.

Por último, se ha calculado la std (“desviación típica”) en función también del número de antenas activas:

$$std[Ma] = \sqrt{\frac{1}{20} * \sum_{i=1}^{20} |Gain [Ma, i] - 1|^2} \quad (4.6)$$

Para finalizar el programa, se ha representado la desviación típica  $std$ , y la ganancia en escala logarítmica. Se han realizado las representaciones de la ganancia en función de 1, 20, 40, 60, 80 y 100 antenas activas para ver cómo evoluciona la ganancia.

## **CAPÍTULO V: RESULTADOS**

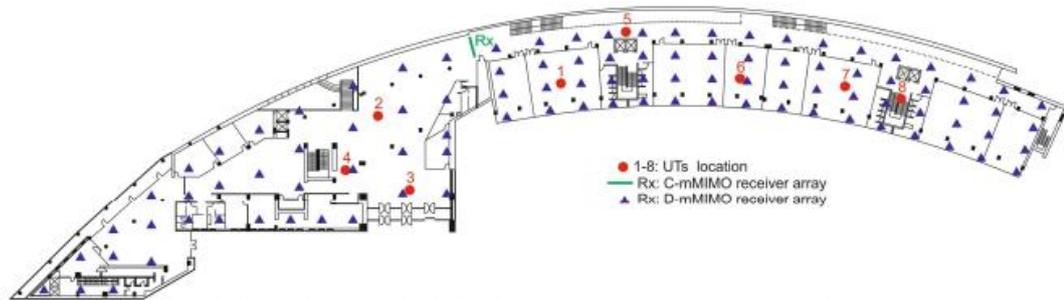
En este quinto capítulo, se van a comentar los resultados obtenidos tanto de la ganancia como de la desviación típica del canal mMIMO. Además, dicho resultados se van a comparar con los resultados obtenidos en función de la frecuencia para este mismo entorno, estos resultados fueron obtenidos en [17], y se compararán también ambas tecnologías del MIMO masivo: el sistema concentrado y el distribuido. Se expondrán las similitudes y diferencias.

## **5.1 EXPLICACIÓN RESULTADOS**

Como se ha explicado en este documento, hay dos tecnologías en lo que refiere al sistema MIMO masivo. Vamos a comprobar cómo se comporta la ganancia del canal gracias al fenómeno de channel hardening y también veremos desde la perspectiva de la desviación típica. Este fenómeno se produce cuando en nuestro sistema tenemos un número alto de antenas para un número de usuarios. Por lo que gracias a los resultados que se han obtenido, podremos visualizar mediante gráficas como este fenómeno se lleva a cabo.

Una vez comentados los resultados obtenidos mediante nuestro estudio del channel hardening en el espacio, se van a comparar los resultados con otro estudio del channel hardening pero en función de la frecuencia [16].

Vamos a tener dos tipos principales de gráficas. Por un lado, tenemos las gráficas que proporcionan los datos de la desviación típica para cada transmisor. Y por otro vamos a tener la ganancia del sistema para 1, 20, 40, 60, 80 y 100 antenas activas y veremos las diferencias.



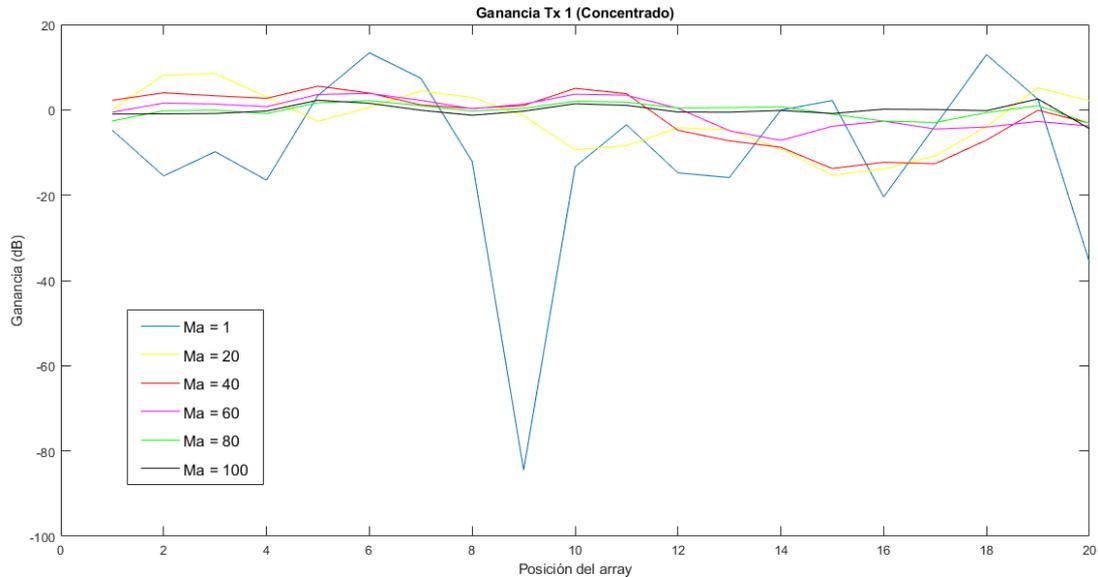
**Figura 11.** Vista de transmisores y receptores para ambos sistemas MIMO en CINDOOR [15]

Para los resultados de la desviación típica, se han expuesto los resultados de todos los transmisores en la misma gráfica, y luego se han expuesto los resultados de los transmisores 1 y 5 y por otro lado los resultados de los transmisores 7 y 8. También, en las gráficas se ha dibujado la función de dispersión Rayleigh para que visualmente sea más fácil ver como los resultados siguen la tendencia de la dispersión de Rayleigh.

## 5.2 RESULTADOS MIMO MASIVO CONCENTRADO

### 5.2.1 Ganancia

En este apartado, se va a comentar la ganancia obtenida en función de 1, 20, 40, 60, 80 o 100 antenas activas. Los valores de ganancia están siempre normalizados, de forma que su media es independiente del número de antenas activas. Estos resultados se han obtenido únicamente para el transmisor 1.



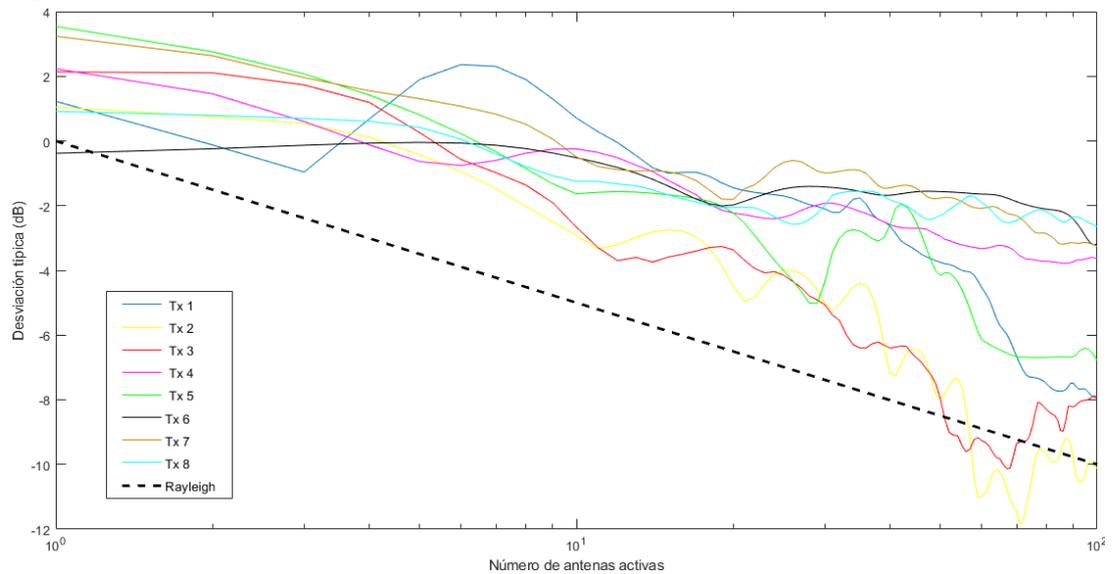
**Figura 12.** Comparación de la ganancia en el canal para el transmisor 1 en función del número de antenas activas en el sistema concentrado

Se puede apreciar que, para una antena activa, el nivel de ganancia fluctúa mucho en función de la posición en que se encuentre. Esto es realmente malo, ya que la ganancia tenga desvanecimientos implica que el dispositivo va a tener que hacer un mayor uso de los recursos para poder mandar la señal correctamente, e incluso el desvanecimiento es muy pronunciado como se aprecia en la posición 9 del array, nos podríamos quedar sin poder transmitir en ese punto.

Gracias a tener un número mayor de antenas, se produce el efecto channel hardening, lo que hace que la ganancia se aplane y sea constante en todos los puntos del array. A mayor número de antenas, el número de desvanecimientos es menor hasta que con 100 antenas es prácticamente constante la ganancia en cualquier punto.

## 5.2.2 Desviación típica

La desviación típica de la ganancia a lo largo de la trayectoria es una forma bien aceptada de medir el nivel de hardening alcanzado. En primer lugar, se van a exponer los resultados obtenidos con el sistema MIMO masivo



**Figura 13.** Desviación típica del canal para MIMO masivo concentrado concentrado.

En la figura anterior, aparecen los resultados de la desviación típica en dB en función del número de antenas activas. Podemos ver como en la gráfica aparecen los 8 transmisores que tenemos en nuestro modelo diferenciados por distintos colores. Se representa también la desviación típica correspondiente a un canal MIMO Rayleigh, cuyos sus canales se suponen incorrelados y con una distribución Gaussiana compleja.

Aun estando los transmisores en distintas ubicaciones de la planta, todos siguen la misma tendencia: a mayor número de antenas, la desviación se hace más pequeña.

Desviación típica (dB)			
Nº antenas activas	1	50	100
Tx 1	1.22	-3.75	-7.93
Tx 2	1.04	-7.97	-10
Tx 3	2.13	-7.97	-7.93
Tx 4	2.23	-2.95	-3.63
Tx 5	3.54	-4.16	-6.78
Tx 6	-0.38	-1.57	-3.22
Tx 7	3.24	-1.76	-3.23
Tx 8	0.91	-2.31	-2.61
<b>Rayleigh</b>	0	-8.49	-10

**Tabla 2.** Comparación desviación típica para cada transmisor y distinto número de antenas activas para el sistema concentrado

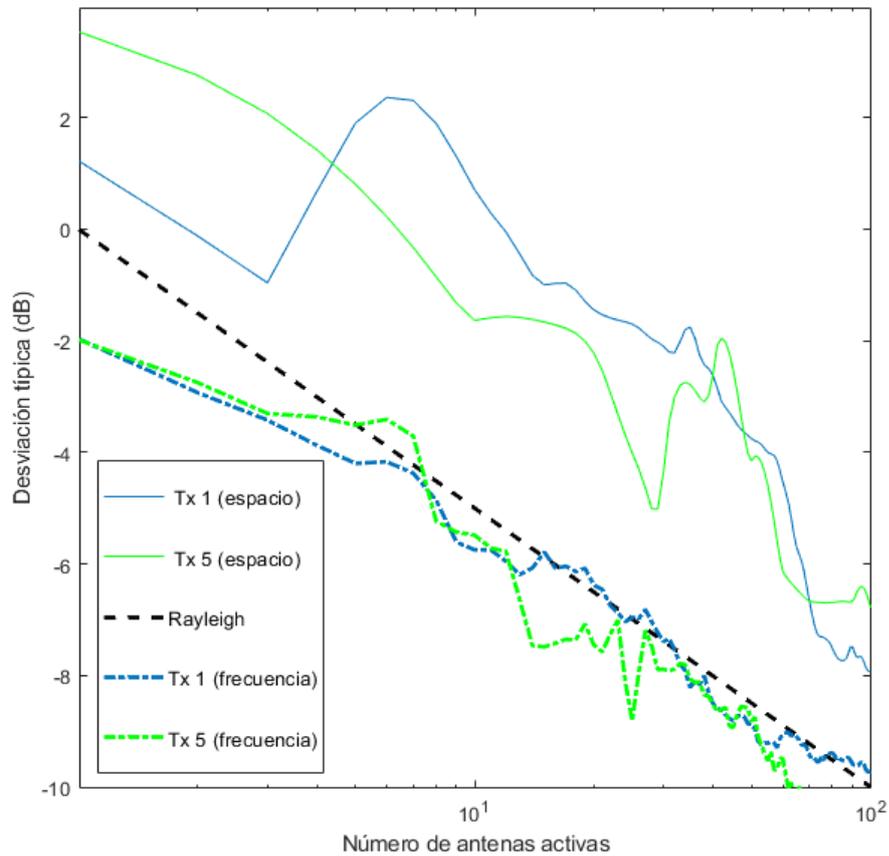
En la tabla anterior podemos ver los valores exactos para cada transmisor con el distinto número de antenas activas. Vemos como para una única antena activa la desviación es bastante alta, para 50 antenas ya ha bajado bastante el nivel de desviación y para 100 antenas el resultado en bastantes casos al canal Rayleigh.

Tanto en la tabla como en la gráfica vemos como para los distintos transmisores el valor puede fluctuar bastante, esto es debido a que hay transmisores que tienen menos antenas cerca, algunos están metidos en aulas cerradas, otras en pasillos, otras en zonas más apartadas... al final tienen distintos valores, pero lo importante es que el efecto channel hardening se produce en todos los transmisores, ya que, al aumentar el número de antenas, la desviación baja.

También se ha añadido a la tabla los valores ideales, que serían los valores de la desviación de Rayleigh. Como hemos comentado, algunos transmisores se acercan más que otros a esos valores ideales.

A continuación, se van a exponer las gráficas de los transmisores 1 y 5 tanto en el dominio del espacio como en el de la frecuencia. Estos transmisores están bastante cerca de ubicación, pero la diferencia es que el

transmisor 1 está dentro de un aula, y en cambio, el transmisor 5 está situado en el pasillo.



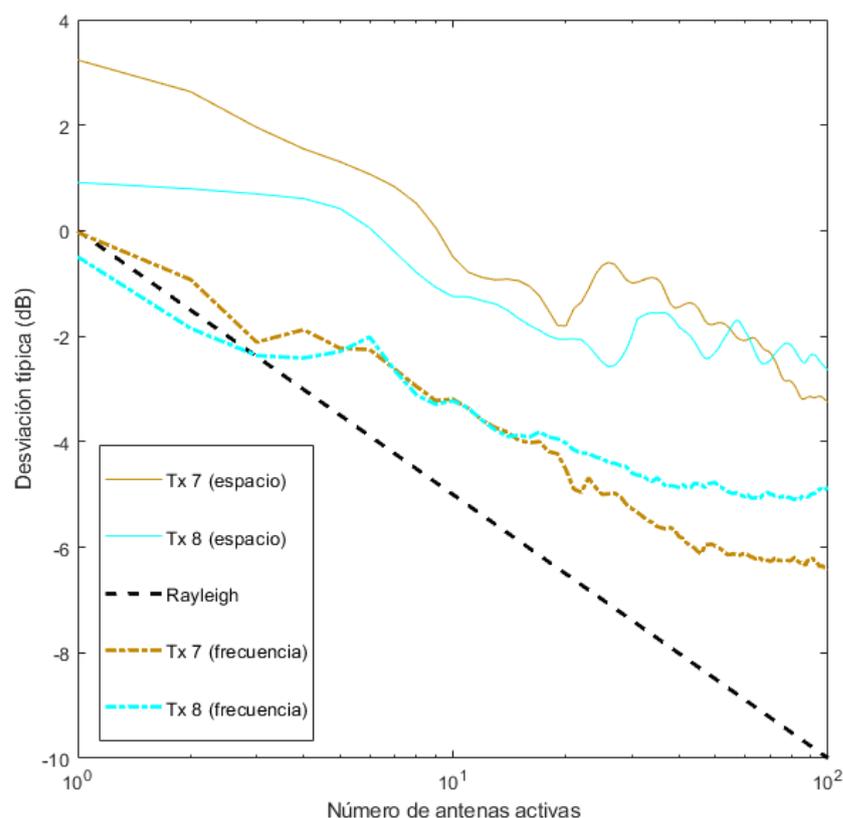
**Figura 14.** Comparación desviación típica para los transmisores 1 y 5 en el dominio del espacio y la frecuencia para el sistema concentrado

Desviación típica (dB)			
Nº antenas activas	1	50	100
<b>Tx 1 (espacio)</b>	1.22	-3.75	-7.93
<b>Tx 5 (espacio)</b>	3.54	-4.16	-6.78
<b>Tx 1 (frecuencia)</b>	-1.98	-8.88	-9.71
<b>Tx 5 (frecuencia)</b>	1.98	-8.82	-10.87
<b>Rayleigh</b>	0	-8.49	-10

**Tabla 3.** Comparación desviación típica para los transmisores 1 y 5 en el dominio del espacio y la frecuencia y distinto número de antenas activas para el sistema concentrado

La posición de ambos transmisores se puede considerar cercana al array de antenas concentradas, esto lleva a cabo unas consecuencias que derivan a que, al aumentar el número de antenas activas, el nivel de desviación sea favorable. En cambio, al posicionar los transmisores en una ubicación más alejada, veremos cómo los niveles de desviación varían. Tanto en la gráfica como en la tabla se puede apreciar que en el dominio de la frecuencia los valores de la desviación son más favorables que en el dominio del espacio.

Los transmisores 7 y 8 son los transmisores más alejados del array de antenas receptoras ubicado al principio del pasillo. El transmisor 7 está ubicado en la sexta aula de nueve y el transmisor 8 en la zona de baños entre el aula 6 y la 7. Como hemos dicho, esto conlleva unas consecuencias que vamos a comentar a continuación con la ayuda de la siguiente gráfica y tabla.



**Figura 15.** Comparación desviación típica para los transmisores 7 y 8 en el dominio del espacio y la frecuencia para el sistema concentrado

Desviación típica (dB)			
Nº antenas activas	1	50	100
Tx 7 (espacio)	3.24	-1.76	-3.23
Tx 8 (espacio)	0.91	-2.31	-2.61
Tx 7 (frecuencia)	-0.03	-5.98	-6.40
Tx 8 (frecuencia)	-0.49	-4.77	-4.87
Rayleigh	0	-8.49	-10

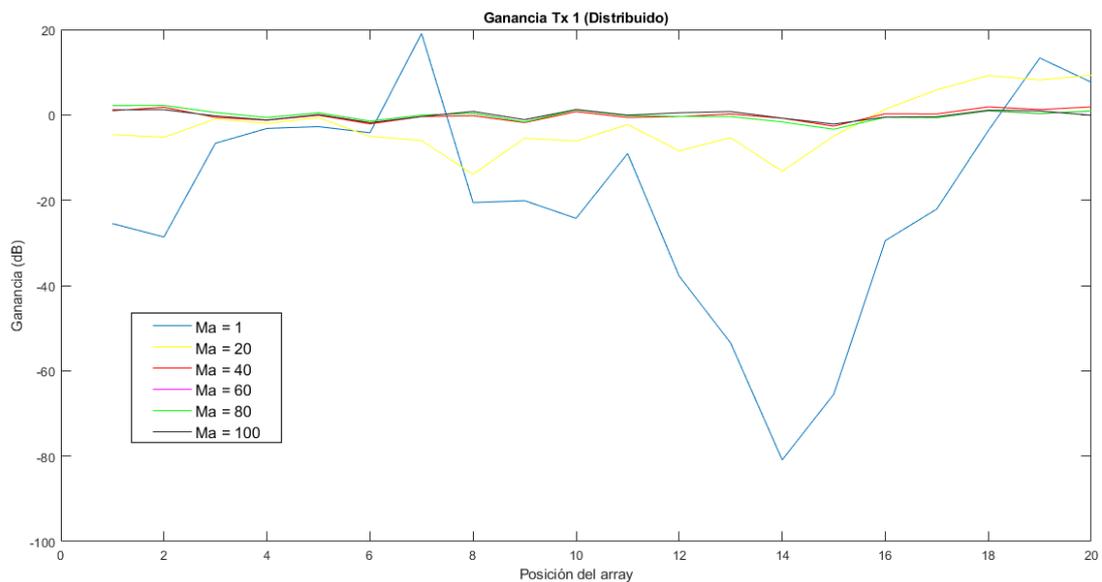
**Tabla 4.** Comparación desviación típica para los transmisores 1 y 5 en el dominio del espacio y la frecuencia y distinto número de antenas activas para el sistema concentrado

En comparación como los transmisores 1 y 5, tenemos peor nivel en la desviación, pero como hemos comentado, es lo normal ya que están más alejados. Aun así, seguimos viendo la misma tendencia descendente a cuanto mayor número de antenas activas hay y también en el dominio de la frecuencia los valores se acercan más al valor ideal de Rayleigh.

## 5.3 RESULTADOS MIMO MASIVO DISTRIBUIDO

### 5.3.1 Ganancia

Como en el apartado 5.2.1, se va a comentar la ganancia obtenida en función del número de antenas activas. Este número varía entre 1, 20, 40, 60, 80 o 100. Los resultados se han obtenido para el transmisor 1.

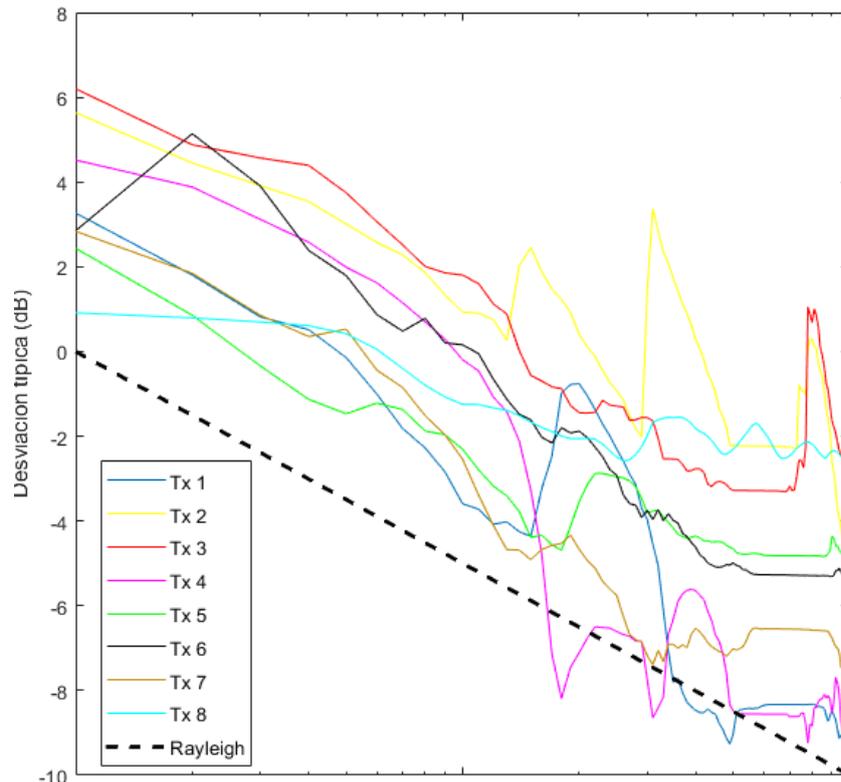


**Figura 16.** Comparación de la ganancia en el canal para el transmisor 1 en función del número de antenas activas en el sistema distribuido

Para una única antena activa, vemos como la ganancia varía mucho en función de la posición en que se encuentre el transmisor. Con 20 antenas activas también se puede apreciar la variación, pero no tiene desvanecimientos tan marcados como con una antena, y a partir de las 20 antenas la ganancia se puede considerar plana, lo que supone que la ganancia es constante en todo el espacio que recorre el transmisor. Observamos que también en el sistema distribuido se produce el fenómeno de hardening.

### 5.3.2 Desviación típica

Como en el apartado 5.2, se van a comentar los resultados para el sistema MIMO masivo distribuido. Se van a exponer las mismas gráficas para poder ver las diferencias entre los dos tipos de sistemas.



**Figura 17.** Desviación típica del canal para MIMO masivo distribuido

Al

igual que en el sistema concentrado, vemos como todos los transmisores siguen la misma tendencia de la desviación de Rayleigh. Todos los transmisores tienen una desviación más pequeña en función del número de antenas activas.

Desviación típica (dB)			
Nº antenas activas	1	50	100
Tx 1	3.26	-9.03	-9.50
Tx 2	5.64	-2.31	-4.71
Tx 3	6.2	-3.28	-2.52
Tx 4	4.51	-8.48	-9.30
Tx 5	2.43	-4.65	-4.90
Tx 6	2.85	-4.99	-5.42
Tx 7	2.85	-7.02	-7.75
Tx 8	0.91	-2.22	-2.64
Rayleigh	0	-8.49	-10

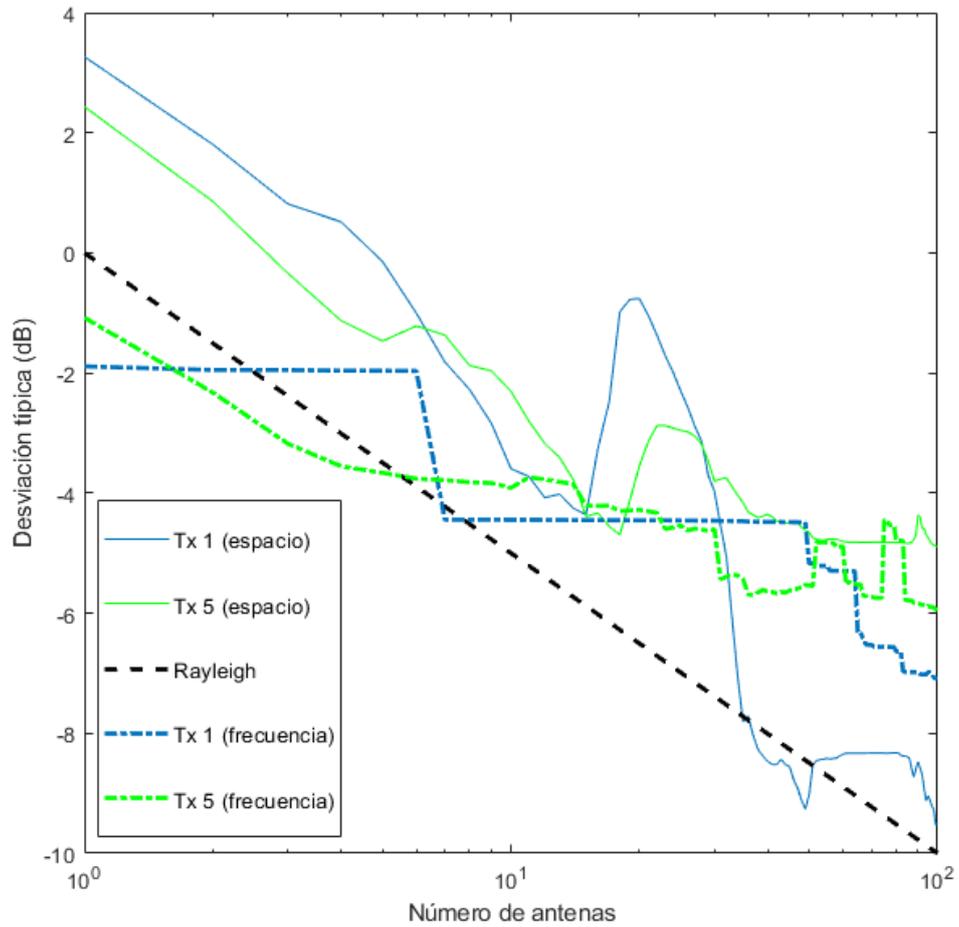
**Tabla 5.** Comparación desviación típica para cada transmisor y distinto número de antenas activas para el sistema concentrado

Al igual que en el sistema concentrado, podemos ver cómo tanto en la gráfica como en la tabla, que los valores obtenidos son los esperados debido al channel hardening. Es normal que haya fluctuaciones entre los transmisores ya que las condiciones de cada uno de ellos son distintas debido a que algunos están en zonas con menos receptores cerca, otros medidos en aulas o con zonas como ascensores que hacen que la señal se pierda en gran medida.

Los transmisores 1 y 4 son los que mejores valores tienen llegando a tener -9.5 dB y -9.30 dB, respectivamente. Los transmisores con peores valores han sido el 3 y 8, con unos valores de -2.52 dB y -2.64 dB, respectivamente.

Aunque la tendencia es la adecuada, se ha de comentar que tampoco se obtiene mucha diferencia entre 50 y 100 antenas activas. Por lo que igual sería conveniente reducir el número de antenas para así reducir costes.

Vamos a comparar los resultados de los transmisores 1 y 5 como se ha hecho en el apartado anterior.



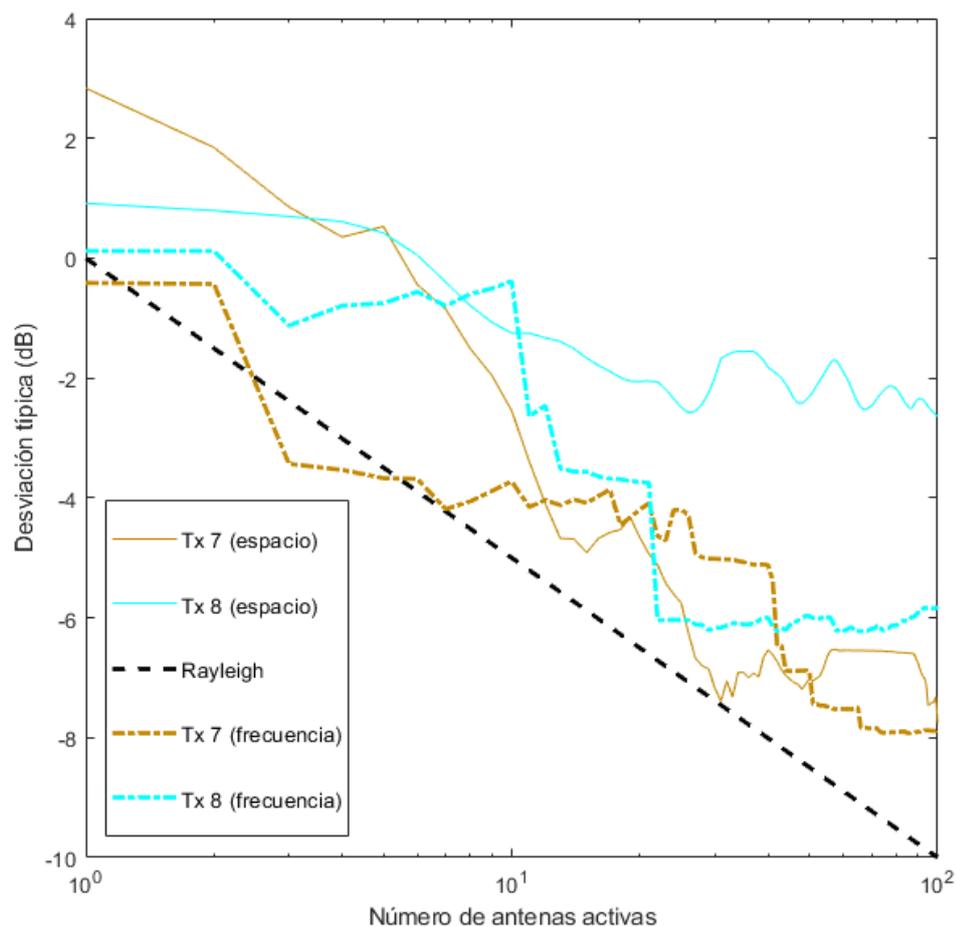
**Figura 18.** Comparación desviación típica para los transmisores 1 y 5 en el dominio del espacio y la frecuencia para el sistema distribuido

Desviación típica (dB)			
Nº antenas activas	1	50	100
Tx 1 (espacio)	3.26	-9.03	-9.50
Tx 5 (espacio)	2.43	-4.65	-4.90
Tx 1 (frecuencia)	-1.89	-5.17	-7.08
Tx 5 (frecuencia)	-1.08	-5.54	-5.94
Rayleigh	0	-8.49	-10

**Tabla 6.** Comparación desviación típica para los transmisores 1 y 5 en el dominio del espacio y la frecuencia y distinto número de antenas activas para el sistema distribuido

Para el sistema distribuido vemos una tendencia distinta que en el sistema concentrado. El transmisor 1 tiene una desviación más alta para una antena activa, pero para 100 antenas activas podemos observar que tiene el valor más acercado a al valor ideal de Rayleigh. El transmisor 5 sigue una tendencia parecida en los dos dominios, aunque en el de la frecuencia siempre tiene valores mejores.

A continuación, se van a comentar los resultados de los transmisores 7 y 8. Estos se encuentran en la zona derecha de la planta de la universidad. Vamos a ver cómo se comportan al encontrarse en una localización más alejada.



**Figura 19.** Comparación desviación típica para los transmisores 7 y 8 en el dominio del espacio y la frecuencia para el sistema distribuido

Desviación típica (dB)			
Nº antenas activas	1	50	100
Tx 7 (espacio)	2.85	-7.02	-7.75
Tx 8 (espacio)	0.91	-2.22	-2.64
Tx 7 (frecuencia)	-0.41	-6.89	-7.88
Tx 8 (frecuencia)	0.12	-5.97	-5.81
Rayleigh	0	-8.49	-10

**Tabla 7.** Comparación desviación típica para los transmisores 7 y 8 en el dominio del espacio y la frecuencia y distinto número de antenas activas para el sistema distribuido

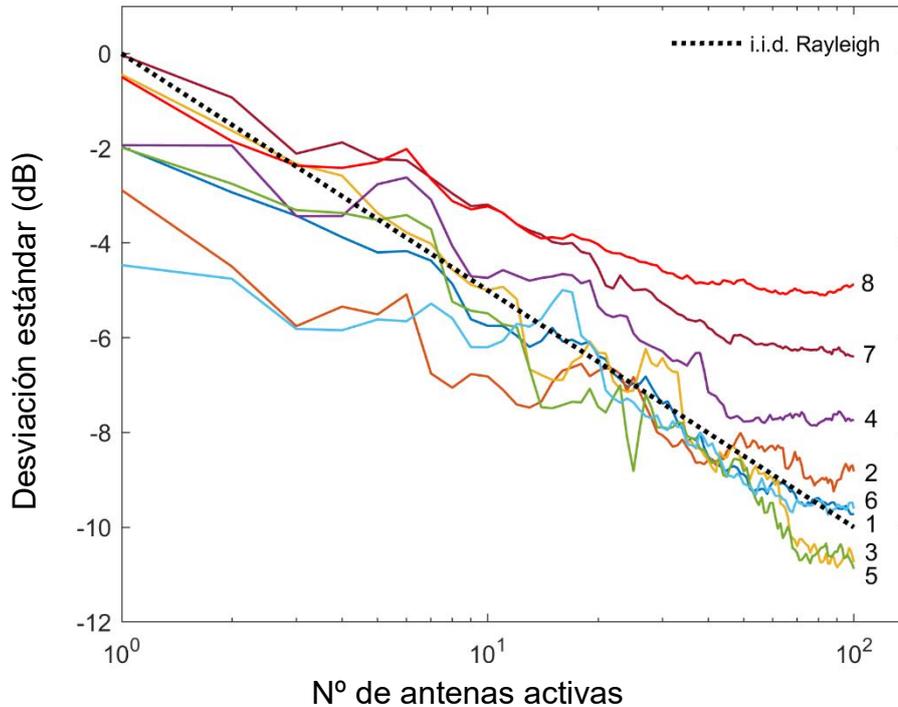
En estos transmisores tenemos peores valores en comparación con los transmisores 1 y 5 en el dominio del espacio, pero en el dominio de la frecuencia sí que mejoran algo. El transmisor 8 podría tener un valor tan alto debido a que está cerca de la zona de ascensores, por lo que supone que la señal de todas las antenas no llegue como debería.

## 5.4 COMPARACIÓN ESPACIO VS FRECUENCIA

Se va a comparar los resultados obtenidos mediante el estudio en la banda de frecuencia de 26 GHz. Se ha realizado el estudio con las mismas condiciones que este documento, esto quiere decir que la ubicación de los transmisores son los mismos, el array de antenas concentradas está en la misma posición y la distribución de antenas para el MIMO distribuido también es el mismo.

### 5.4.1 MIMO concentrado

En primer lugar, vamos a comentar los datos del sistema MIMO masivo concentrado.

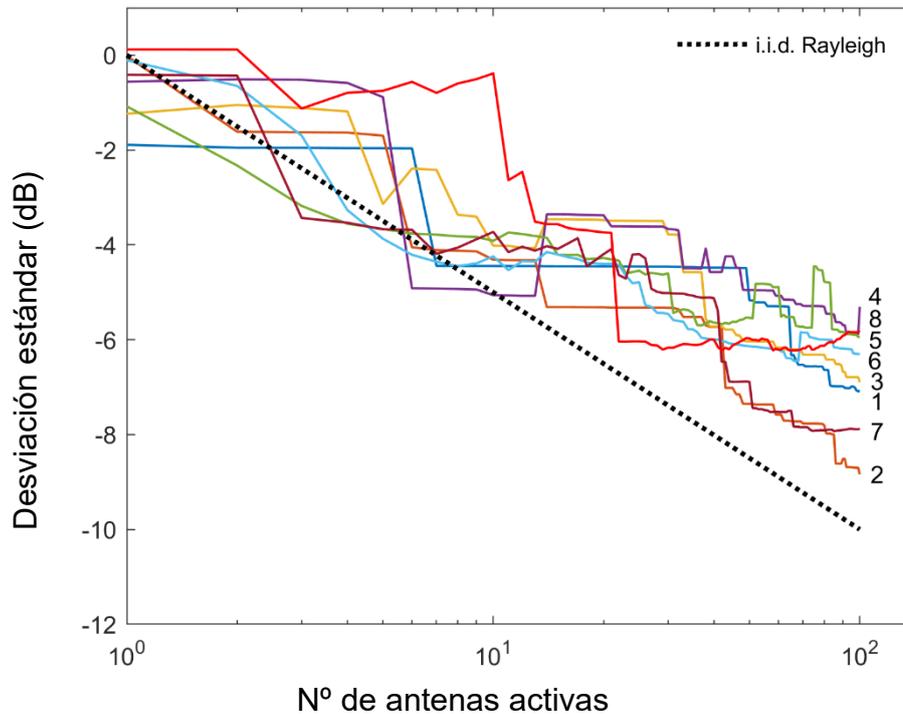


**Figura 20.** Desviación típica del canal para MIMO masivo concentrado en función de la frecuencia a 26 GHz

Como se puede ver en la gráfica, todos los transmisores siguen la tendencia de la desviación típica de Rayleigh. Se aprecia como los transmisores 7 y 8 son aquellos que el valor es mayor, al igual que en función del espacio como hemos visto en capítulos anteriores y los que mejor valor tienen son el 3 y el 5, que incluso rebasan la desviación de Rayleigh. Estos transmisores son los más cercanos al array de antenas receptoras, por lo que se entiende que estos datos tienen sentido.

### 5.4.1 MIMO distribuido

En este apartado vamos a comentar los datos obtenidos mediante el sistema MIMO masivo distribuido.



**Figura 21.** Desviación típica del canal para MIMO masivo concentrado en función de la frecuencia a 26 GHz

Para el sistema MIMO masivo distribuido, vemos como también sigue la tendencia de la desviación de Rayleigh. Podemos observar diferencias respecto al concentrado, ya que las curvas son menos homogéneas.

Para finalizar, se va a exponer una tabla con los máximos, mínimos y la media para 100 antenas activas tanto para el sistema concentrado como para el distribuido.

	Sistema	std <sub>min</sub> (dB)	std <sub>max</sub> (dB)	std (dB)
<b>Ma = 100</b>	C-mMIMO	-10.88	-4.87	-8.59
	D-mMIMO	-8.84	-5.31	-6.76

**Tabla 8.** Comparación de la desviación los ambos sistemas con 100 antenas activas en la medida de la frecuencia a 26 GHz

Se puede observar que el valor medio obtenido con los 8 transmisores para el sistema distribuido es ligeramente menor que para el concentrado. Sin embargo, se puede observar que la diferencia entre los valores máximo y mínimo de la desviación estándar es menor en el caso distribuido.

## **CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES**

En este TFG se ha realizado el estudio del fenómeno denominado channel hardening para la tecnología MIMO masivo en la frecuencia de 26 GHz. Dentro de la tecnología MIMO masivo encontramos los sistemas concentrados y los distribuidos. Estos sistemas se han replicado en la planta 0 de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación de la Universidad de Cantabria.

Se ha considerado un array rectangular de 10x10, esto es, de 100 antenas para el sistema concentrado y para el distribuido se han colocado un total de 100 antenas en toda la planta una cobertura lo más homogénea posible. En las simulaciones, se ha ido aumentando el número de antenas activas para así comprobar cómo se produce el efecto channel hardening.

En cuanto a los resultados, podemos decir que el sistema MIMO masivo distribuido da mejores resultados tanto de la desviación típica como en ganancia, pero tampoco son unos resultados significativamente tan buenos para suponer un gasto mayor. Ya que el ubicar un número mayor de antenas supone un coste superior a poner en una única ubicación todas las antenas.

En los casos particulares que se han estudiado, también vemos diferencias en los resultados. Por un lado, se han estudiado los transmisores 1 y 5, los cuales se encuentran cerca del sistema concentrado y además en una ubicación central de la planta, lo que hace que en el sistema distribuido tengan un mayor número de antenas con las cuales tener comunicación eficiente. Estos transmisores se han comparado con los transmisores 7 y 8, los cuales están en la zona derecha de la planta, uno de ellos dentro de un aula y el otro en la zona de ascensores.

Tanto en el sistema concentrado como en el distribuido, los transmisores 1 y 5 tienen mejores valores de ganancia y desviación típica que los transmisores 7 y 8.

También se ha podido comprobar, que en el sistema distribuido no hay diferencia apreciable entre tener 50 o 100 antenas activas, lo que supone que podríamos reducir gastos y tener los mismos resultados para los usuarios.

Para el concentrado si se observan ligeras diferencias en algunos transmisores. En los sistemas concentrados los gastos no se reducen tanto, ya que todas las antenas están en la misma ubicación.

## REFERENCIAS:

- [1] Eumed.net. (2016). *Evolución de la tecnología móvil. Camino a 5G*. <https://www.eumed.net/rev/cccss/2016/04/5G.html>
- [2] Evoca. (2019). *El impacto del 5G*. <http://evocaimagen.com/cuadernos-tecnologia/cuadernos-evoca-tecnologia-1.pdf>
- [3] Ana Albira León de Juan. (2020). *De 1G a 5G: La evolución de las tecnologías de telefonía móvil*<https://sige20.wordpress.com/2020/11/17/de-1g-a-5g-la-evolucion-de-las-tecnologias-de-telefonía-movil/>
- [4] Víctor A. Figueroa. C., Jennifer E. Chóez C., Jennifer X. Barreto P., Carlos A. Villacreses P. (2022). *5G tecnología inalámbrica que cambiará el mundo por completo*. <https://pdfs.semanticscholar.org/2988/7ce89960c3735d2b915d50466c352da35ca0.pdf>
- [5] ABB Review. (2021). *5G para industrias digitales*. <https://new.abb.com/news/es/detail/77917/5g-para-industrias-digitales>
- [7] E. G. Larsson, O. Edfors, F. Tufvesson, and T. L. Marzetta, "Massive MIMO for next generation wireless systems," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 2, pp. 186– 195, Feb. 2014, doi: 10.1109/MCOM.2014.6736761.
- [8] Rafael P. Torres, Jesús R. Pérez, and Luis Valle. (2023). *Channel Hardening: A Comparison between Concentrated and Distributed Massive MIMO*. In *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. DOI 10.1109/LAWP.2023.3241481
- [9] Alexander Arias. 2013. *Diseño de un driver de control de un esquema SDMA para una red inalámbrica*. <https://repositorio.itm.edu.co/handle/20.500.12622/79>
- [10] Marcele Mendonca, Tadeu N. Ferrerira, Paulo S. R. Diniz, Lisandro Lovisoló. (2019). *Antenna Selection in Massive MIMO Based on Greedy Algorithms*. DOI:10.1109/TWC.2019.2959317 [https://www.researchgate.net/publication/338060773\\_Antenna\\_Selection\\_in\\_Massive\\_MIMO\\_Based\\_on\\_Greedy\\_Algorithms](https://www.researchgate.net/publication/338060773_Antenna_Selection_in_Massive_MIMO_Based_on_Greedy_Algorithms)
- [11] Cuevas Esteban, Héctor (2017). *Propuesta de aplicación de la tecnología MIMO masivo a las comunicaciones móviles 5G*. <https://oa.upm.es/44669/>

- [12] Piqué, I. (2018). Estudio de sistemas de Beamforming analógico-digitales. Universidad Carlos III de Madrid.
- [13] Tamara Coello Garrido. (2016). *Diseño de un sistema de comunicaciones MIMO masivo multiusuario*. <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/26613>
- [14] T. L. Marzetta, "Massive MIMO: An Introduction," in Bell Labs Technical Journal
- [15] ITU-R. (2015a, julio). Efectos de los materiales y estructuras de construcción en la propagación de las ondas radioeléctricas por encima de unos 100 MHz (P.2040-1). <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.2040/es>
- [16] Z. Chen, E. Björnson and E. G. Larsson. (2020). *Dynamic Resource Allocation in Co-Located and Cell-Free Massive MIMO*.
- [17] Javier Merino Polidura. (2021). *Análisis comparativo de las tecnologías Massive MIMO concentrado y distribuido en entornos de interiores mediante trazado de rayos*.