


	<b>GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS</b>						  
	<b>CARTA DE AUTORIZACIÓN</b>						
<b>CÓDIGO</b>	<b>AP-BIB-FO-06</b>	<b>VERSIÓN</b>	<b>1</b>	<b>VIGENCIA</b>	<b>2014</b>	<b>PÁGINA</b>	<b>1 de 2</b>

Neiva, 01 de abril de 2016

Señores

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Ciudad

El (Los) suscrito(s):

\_\_\_\_\_ Diego Armando Cuchimba Collazos \_\_\_\_\_, con C.C. No. 1.075.259.388 \_\_\_\_\_,  
 \_\_\_\_\_, con C.C. No. \_\_\_\_\_,  
 \_\_\_\_\_, con C.C. No. \_\_\_\_\_,  
 \_\_\_\_\_, con C.C. No. \_\_\_\_\_,

autor(es) de la tesis y/o trabajo de grado o \_\_\_\_\_

titulado Análisis del rendimiento de sistemas MIMO Masivo

presentado y aprobado en el año 2016 como requisito para optar al título de

Ingeniero Electrónico \_\_\_\_\_;

autorizo (amos) al CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN de la Universidad Surcolombiana para que con fines académicos, muestre al país y el exterior la producción intelectual de la Universidad Surcolombiana, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo de grado en los sitios web que administra la Universidad, en bases de datos, repositorio digital, catálogos y en otros sitios web, redes y sistemas de información nacionales e internacionales “open access” y en las redes de información con las cuales tenga convenio la Institución.

- Permita la consulta, la reproducción y préstamo a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato Cd-Rom o digital desde internet, intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer, dentro de los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia.

	<b>GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS</b>						
	<b>CARTA DE AUTORIZACIÓN</b>						
<b>CÓDIGO</b>	<b>AP-BIB-FO-06</b>	<b>VERSIÓN</b>	<b>1</b>	<b>VIGENCIA</b>	<b>2014</b>	<b>PÁGINA</b>	<b>2 de 2</b>

- Continúo conservando los correspondientes derechos sin modificación o restricción alguna; puesto que de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación del derecho de autor y sus conexos.






De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, “Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores” , los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

EL AUTOR/ESTUDIANTE:  
 Firma:

EL AUTOR/ESTUDIANTE:  
 Firma: \_\_\_\_\_

EL AUTOR/ESTUDIANTE:  
 Firma: \_\_\_\_\_

EL AUTOR/ESTUDIANTE:  
 Firma: \_\_\_\_\_

	<b>GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS</b>						   
	<b>DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO</b>						
<b>CÓDIGO</b>	<b>AP-BIB-FO-07</b>	<b>VERSIÓN</b>	<b>1</b>	<b>VIGENCIA</b>	<b>2014</b>	<b>PÁGINA</b>	<b>1 de 4</b>

**TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO:** Análisis del rendimiento de sistemas MIMO Masivo

**AUTOR O AUTORES:**

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Cuchimba Collazos	Diego Armando

**DIRECTOR Y CODIRECTOR TESIS:**

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Bravo Obando	Martín Diomedes

**ASESOR (ES):**

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre

**PARA OPTAR AL TÍTULO DE:** Ingeniero electrónico





**FACULTAD:** Ingeniería

**PROGRAMA O POSGRADO:** Ingeniería electrónica

**CIUDAD:** Neiva

**AÑO DE PRESENTACIÓN:** 2016

**NÚMERO DE PÁGINAS:** 52

	<b>GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS</b>						  
	<b>DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO</b>						
<b>CÓDIGO</b>	<b>AP-BIB-FO-07</b>	<b>VERSIÓN</b>	<b>1</b>	<b>VIGENCIA</b>	<b>2014</b>	<b>PÁGINA</b>	<b>2 de 4</b>

**TIPO DE ILUSTRACIONES** (Marcar con una X):

Diagramas X Fotografías \_\_\_ Grabaciones en discos \_\_\_ Ilustraciones en general X Grabados \_\_\_ Láminas \_\_\_  
 Litografías \_\_\_ Mapas \_\_\_ Música impresa \_\_\_ Planos \_\_\_ Retratos \_\_\_ Sin ilustraciones \_\_\_ Tablas o Cuadros \_\_\_

**SOFTWARE** requerido y/o especializado para la lectura del documento: MATLAB®, para la lectura del Anexo A.

**MATERIAL ANEXO:** Anexo A. Códigos en MATLAB. Incluido en el disco de la tesis.





**PREMIO O DISTINCIÓN** (En caso de ser LAUREADAS o Meritoria):

**PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS:**

<u>Español</u>	<u>Inglés</u>	<u>Español</u>	<u>Inglés</u>
1. Eficiencia espectral	Spectral efficiency	6. Precodificación lineal	Linear precoding
2. Eficiencia de energía	Energy efficiency	7. ZF	ZF
3. MIMO Masivo	Massive MIMO	8. 5G	5G
4. MMSE	MMSE	9. _____	_____
5. MRT	MRT	10. _____	_____

**RESUMEN DEL CONTENIDO:** (Máximo 250 palabras)

La quinta generación de redes móviles (5G) tiene como objetivo satisfacer la gran demanda de datos móviles que existirá a partir del año 2021, producto del desarrollo de nuevas tecnologías, aplicaciones y servicios. Sus principales requerimientos son alcanzar altas tasas de transmisión de datos, capacidad de usuarios masiva, bajo consumo de energía, alta fiabilidad de la comunicación y baja latencia. Los sistemas MIMO Masivo, aquellos que utilizan grandes arreglos de antenas en la estación base para transmitir a múltiples usuarios en el mismo recurso de tiempo-frecuencia, han sido propuestos para resolver estas exigencias. En este trabajo se analiza el rendimiento de las técnicas de precodificación lineal MMSE, MRT y ZF para el enlace descendente de MIMO Masivo sobre un modelo de canal Rayleigh, en términos de tasa de transmisión de datos, eficiencia espectral y de energía. Se verifica que el procesamiento lineal es viable para las condiciones de propagación que caracterizan estos sistemas y que mejora los parámetros mencionados.

	<b>GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS</b>				  		
	<b>DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO</b>						
<b>CÓDIGO</b>	<b>AP-BIB-FO-07</b>	<b>VERSIÓN</b>	<b>1</b>	<b>VIGENCIA</b>	<b>2014</b>	<b>PÁGINA</b>	<b>3 de 4</b>

**ABSTRACT:** (Máximo 250 palabras)

The fifth generation mobile network (5G) aims to meet the high demand for mobile data that will exist from 2021, due to the development of new technologies, applications and services. Where the main requirements are to achieve high data rates, massive user capacity, low power consumption, high reliability and low latency. The Massive MIMO systems, where using large arrays of antennas at the base station to serve many users in the same time-frequency resource, have been proposed to meet these requirements. In this work, the performance of linear precoding techniques as MMSE, ZF and MRT for Massive MIMO downlink system over Rayleigh channel model is analysed in terms of data rate, spectral and energy efficiency. It is verified that linear processing is feasible for propagation conditions that characterize these systems and improves the above parameters.



## GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS

### DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO



**CÓDIGO**

**AP-BIB-FO-07**

**VERSIÓN**

**1**

**VIGENCIA**

**2014**

**PÁGINA**

**4 de 4**

Empty box for the description of the thesis or degree work.

#### APROBACION DE LA TESIS

Nombre Presidente Jurado:

Firma:

Nombre Jurado: **Julián Adolfo Ramírez Gutiérrez**

Firma:

Nombre Jurado: **Jesús David Quintero Polanco**

Firma:

ANÁLISIS DEL RENDIMIENTO DE SISTEMAS MIMO MASIVO

DIEGO ARMANDO CUCHIMBA COLLAZOS

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA  
NEIVA – HUILA  
2016

ANÁLISIS DEL RENDIMIENTO DE SISTEMAS MIMO MASIVO

DIEGO ARMANDO CUCHIMBA COLLAZOS

Trabajo de grado presentado para optar al título de  
Ingeniero Electrónico

Director  
MARTÍN DIOMEDES BRAVO OBANDO  
Ing. Ph.D.(c) en Teleinformática

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA  
NEIVA – HUILA  
2016



Nota de aceptación:

---

---

---

---

---

---

---

---

Firma del director del proyecto

---

Firma del primer jurado

---

Firma del segundo jurado

Neiva, marzo de 2016.

*A mis padres y hermanos, por su apoyo incondicional.*

## AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mis agradecimientos al cuerpo docente y administrativo del programa de Ingeniería Electrónica de la Universidad Surcolombiana, por su labor educativa y calidez humana. En especial, mi gratitud con el ingeniero Martín Diomedes Bravo Obando, por su orientación y apoyo como director de proyecto.

Infinitas gracias a mi familia, por su apoyo y comprensión durante estos años de estudio. A mis amigos, por acompañarme en esta maravillosa etapa y hacerla inolvidable.

# CONTENIDO

	pág.
LISTA DE FIGURAS	8
ACRÓNIMOS	10
NOTACIÓN	12
RESUMEN	13
ABSTRACT	14
INTRODUCCIÓN	15
<b>I SISTEMAS MIMO Y MIMO MASIVO</b>	<b>19</b>
<b>1 SISTEMAS MIMO</b>	<b>20</b>
1.1 SU-MIMO . . . . .	20
1.2 MU-MIMO . . . . .	21
<b>2 SISTEMAS MIMO MASIVO</b>	<b>22</b>
2.1 ESTIMACIÓN DEL CANAL . . . . .	23
2.1.1 Sistemas en modo FDD . . . . .	23
2.1.2 Sistemas en modo TDD . . . . .	24
2.2 TRANSMISIÓN ASCENDENTE . . . . .	25
2.3 TRANSMISIÓN DESCENDENTE . . . . .	26
2.4 PRECODIFICACIÓN LINEAL . . . . .	26
2.4.1 Precodificación MMSE . . . . .	27
2.4.2 Precodificación ZF . . . . .	28
2.4.3 Precodificación MRT . . . . .	29

<b>II</b>	<b>EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE MIMO MASIVO</b>	<b>30</b>
<b>3</b>	<b>MODELO DEL SISTEMA</b>	<b>31</b>
3.1	IMPLEMENTACIÓN . . . . .	32
<b>4</b>	<b>PARÁMETROS CONSIDERADOS EN LA EVALUACIÓN DE MIMO MASIVO</b>	<b>33</b>
4.1	TASA DE TRANSMISIÓN ALCANZABLE . . . . .	33
4.2	EFICIENCIA ESPECTRAL . . . . .	35
4.3	EFICIENCIA DE ENERGÍA . . . . .	35
<b>5</b>	<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS</b>	<b>36</b>
5.1	Escenario I . . . . .	36
5.2	Escenario II . . . . .	38
5.3	Escenario III . . . . .	42
5.4	Escenario IV . . . . .	43
5.5	Escenario V . . . . .	45
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>48</b>
<b>7</b>	<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>49</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>50</b>
	<b>ANEXOS</b>	<b>52</b>

## LISTA DE FIGURAS

		pág.
1	Suscripciones de teléfonos móviles según tecnología. . . . .	16
2	Tráfico de datos móviles a nivel mundial. . . . .	17
3	Estructura MIMO con Único Usuario. . . . .	20
4	Estructura MIMO con Múltiples Usuarios en enlace descendente. . . . .	21
5	Precodificación lineal en MIMO Masivo. . . . .	27
6	Modelo del sistema MIMO Masivo. . . . .	31
7	Diagrama de bloques del sistema. . . . .	32
8	Tasa de transmisión alcanzable con diferente SNR cuando $M=20$ y $K=10$ . . . . .	36
9	Tasa de transmisión alcanzable con diferente SNR cuando $M=40$ y $K=10$ . . . . .	37
10	Tasa de transmisión alcanzable con diferente SNR cuando $M=80$ y $K=10$ . . . . .	38
11	Tasa de transmisión alcanzable con diferente SNR cuando $M=80$ y $K=20$ . . . . .	39
12	Tasa de transmisión alcanzable con diferente SNR cuando $M=80$ y $K=40$ . . . . .	39
13	Tasa de transmisión alcanzable con diferente SNR cuando $M=80$ y $K=60$ . . . . .	40
14	Tasa de transmisión alcanzable con diferente SNR cuando $M=80$ y $K=75$ . . . . .	41
15	Tasa de transmisión por usuario cuando $M=20$ , $K=10$ y $\text{SNR}=6$ dB. . . . .	42
16	Tasa de transmisión promedio por usuario vs. número de usuarios cuando $M=80$ y $\text{SNR}=10$ dB. . . . .	43
17	Eficiencia espectral vs. número de antenas cuando $K=10$ y $\text{SNR}=10$ dB. . . . .	44
18	Eficiencia espectral vs. número de usuarios cuando $M=80$ y $\text{SNR}=10$ dB. . . . .	45
19	Eficiencia de energía vs. eficiencia espectral cuando $K=10$ y $\text{SNR}=10$ dB. . . . .	46
20	Eficiencia de energía vs. eficiencia espectral cuando $M=80$ y $\text{SNR}=10$ dB. . . . .	47

# LISTA DE ANEXOS

	pág.
ANEXO A. Códigos en Matlab . . . . .	52

# ACRÓNIMOS

**5G** 5th Generation mobile networks (Quinta Generación de redes móviles).

**AWGN** Additive White Gaussian Noise (Ruido Gaussiano Blanco Aditivo).

**CSI** Channel State Information (Información de Estado del Canal).

**EB** Exabyte.

**EDGE** Enhanced Data for Global Evolution (Tasa de datos Mejorada para la evolución de GSM).

**FDD** Frequency Division Duplex (Dúplex por División en Frecuencia).

**GSM** Global System for Mobile communications (Sistema Global para las comunicaciones Móviles).

**HSPA** High Speed Packet Access (Acceso por Paquetes en Enlace de Bajada de Alta Velocidad).

**ICT** Information and communications technology (Tecnologías de la Información y Comunicación).

**IoT** Internet of Things (Internet de los Objetos).

**ITU** International Telecommunication Union (Unión Internacional de Telecomunicaciones).

**LTE** Long-Term Evolution (Evolución a largo plazo).

**MaMi** Massive MIMO (MIMO Masivo).

**MIMO** Multiple-Input Multiple-Output (Múltiples-Entradas Múltiples-Salidas).

**MMSE** Minimum Mean Square Error (Mínimo Error Cuadrático Medio).

**MRT** Maximum Ratio Transmission (Transmisión con Relación Máxima).



**MU-MIMO** Multiple User MIMO (MIMO con Múltiples Usuarios).

**SINR** Signal to Interference plus Noise Ratio (Relación Señal a Interferencia más Ruido).

**SNR** Signal to Noise Ratio (Relación Señal a Ruido).

**SU-MIMO** Single User MIMO (MIMO con Único Usuario).

**TDD** Time Division Duplex (Dúplex por División en Tiempo).

**UMTS** Universal Mobile Telecommunications System (Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles).

**WCDMA** Wide-band Code Division Multiple Access (Acceso Múltiple por División en Códigos de Banda Ancha).

**ZF** Zero Forcing (Forzamiento a Cero).

## NOTACIÓN

$a$	Escalar $a$
$\mathbf{x}$	Vector $\mathbf{x}$
$\mathbf{X}$	Matriz $\mathbf{X}$
$\mathbf{I}_N$	Matriz identidad de dimensión $N$
$(\cdot)^*$	Conjugación compleja
$(\cdot)^T$	Transposición
$(\cdot)^H$	Transposición Hermitiana
$(\cdot)^{-1}$	Inversión
$ \cdot $	Valor absoluto de un número complejo
$\ \cdot\ $	Norma euclidiana de un vector
$\text{tr}(\mathbf{X})$	Traza de la matriz $\mathbf{X}$
$\mathbb{E}[\cdot]$	Operación esperanza o valor esperado
$\mathbb{R}$	Conjunto de números reales
$\mathbb{C}$	Conjunto de números complejos

## RESUMEN

La quinta generación de redes móviles (5G) tiene como objetivo satisfacer la gran demanda de datos móviles que existirá a partir del año 2021, producto del desarrollo de nuevas tecnologías, aplicaciones y servicios. Sus principales requerimientos son alcanzar altas tasas de transmisión de datos, capacidad de usuarios masiva, bajo consumo de energía, alta fiabilidad de la comunicación y baja latencia. Los sistemas MIMO Masivo, aquellos que utilizan grandes arreglos de antenas en la estación base para transmitir a múltiples usuarios en el mismo recurso de tiempo-frecuencia, han sido propuestos para resolver estas exigencias.

En este trabajo se analiza el rendimiento de las técnicas de precodificación lineal MMSE, MRT y ZF para el enlace descendente de MIMO Masivo sobre un modelo de canal Rayleigh, en términos de tasa de transmisión de datos, eficiencia espectral y de energía. Se verifica que el procesamiento lineal es viable para las condiciones de propagación que caracterizan estos sistemas y que mejora los parámetros mencionados.

### **PALABRAS CLAVES:**

Eficiencia espectral y de energía, MIMO Masivo, MMSE, MRT, precodificación lineal, ZF, 5G.

# ABSTRACT

The fifth generation mobile network (5G) aims to meet the high demand for mobile data that will exist from 2021, due to the development of new technologies, applications and services. Where the main requirements are to achieve high data rates, massive user capacity, low power consumption, high reliability and low latency. The Massive MIMO systems, where using large arrays of antennas at the base station to serve many users in the same time-frequency resource, have been proposed to meet these requirements.

In this work, the performance of linear precoding techniques as MMSE, ZF and MRT for Massive MIMO downlink system over Rayleigh channel model is analyzed in terms of data rate, spectral and energy efficiency. It is verified that linear processing is feasible for propagation conditions that characterize these systems and improves the above parameters.

## KEYWORDS:

Energy efficiency, linear precoding, massive MIMO, MMSE, MRT, spectral efficiency, ZF, 5G.

# INTRODUCCIÓN

El tráfico de datos móviles aumenta a pasos agigantados, impulsado por el desarrollo de nuevas tecnologías, dispositivos, aplicaciones y servicios. Para el año 2021 se espera un crecimiento de por lo menos 10 veces el tráfico medido durante el 2015, que fue superior a 5 exabytes (EB) por mes y representó un aumento del 65 % respecto al percibido en el 2014. De estos 51 EB por mes proyectados, alrededor del 90 % estará asociado al uso de teléfonos inteligentes. En la actualidad, las tecnologías GSM y EDGE dominan el mercado de suscripciones a nivel mundial. Al final del año 2015 se alcanzó una cifra cercana a los 7.4 billones de suscripciones, de las cuales 850 millones corresponden a usuarios de LTE. No obstante, considerando el rápido despliegue de las redes de telefonía móvil más avanzadas y las nuevas necesidades de los usuarios, para el año 2021 se espera un dominio de LTE con alrededor de 4.1 billones de suscripciones, seguido por WCDMA y HSPA como se puede observar en la figura 1. En menor cantidad se encontrarán usuarios de otras tecnologías y de 5G, que se lanzaría en este año alcanzando un número de suscripciones del orden de 150 millones. Estas estadísticas corresponden al último reporte de Ericsson<sup>1</sup>.

La quinta generación de telefonía móvil es la respuesta tecnológica a los futuros retos en materia de conectividad. Además de ofrecer mejoras en los servicios de banda ancha móvil, como alta tasa de transmisión de datos, confiabilidad y menor latencia, su principal objetivo es soportar la complejidad y la gran demanda de datos resultante de integrar las aplicaciones del Internet de los objetos (IoT) a la red, sin olvidar el compromiso de mantener un bajo consumo de energía. El Internet de los objetos es la infraestructura mundial para la sociedad de la información que propicia la prestación de servicios avanzados mediante la interconexión de objetos físicos y virtuales gracias a la interoperabilidad de Tecnologías de la información y la comunicación (ICT) presentes y futuras, de acuerdo a ITU<sup>2</sup>. En consecuencia, los sistemas MIMO Masivo (MaMi), aquellos que utilizan decenas a cientos de antenas en los terminales de comunicación<sup>3</sup>, han sido propuestos para hacer frente a estas exigencias: al escalar los sistemas MIMO actuales a un orden superior se obtienen mejoras en términos de eficiencia espectral y de energía, explotación de más grados de libertad, multiplexación espacio-temporal, disminución de latencia y aumento de la tasa de transmisión de datos del sistema.

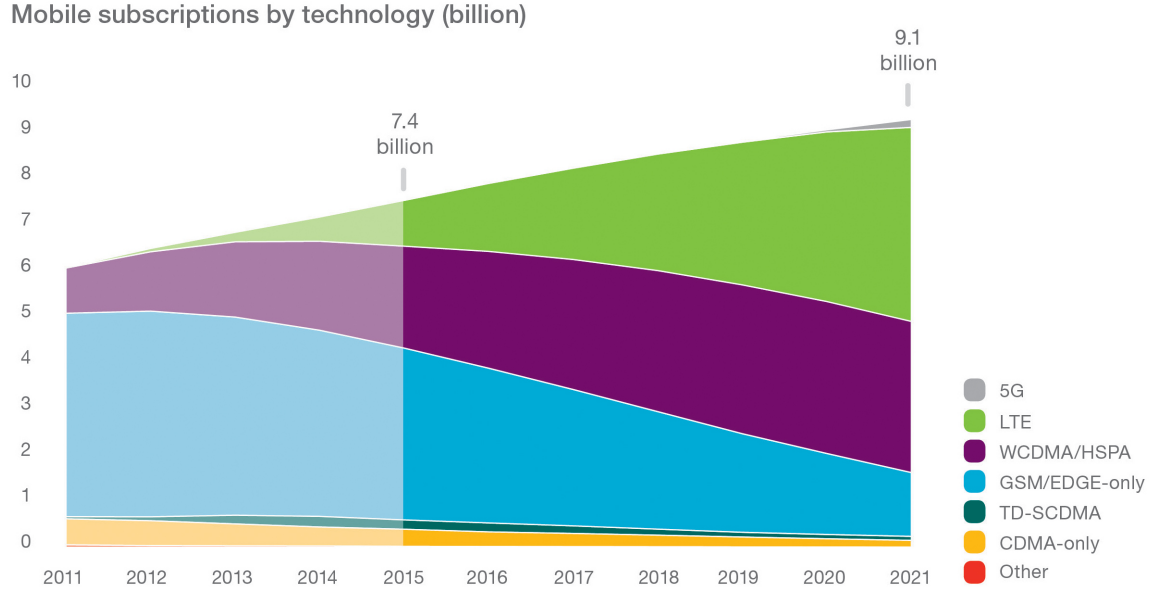
---

<sup>1</sup>Ericsson. *Ericsson Mobility Report*. 2015.

<sup>2</sup>ITU. *Recommendation ITU-T Y.2060: Overview of the Internet of things*. 2012.

<sup>3</sup>A. Chockalingam y B. Rajan. *Large MIMO Systems*. Cambridge University Press, 2014.

**Figura 1:** Suscripciones de teléfonos móviles según tecnología.



Fuente: Ericsson. *Ericsson Mobility Report*. 2015.

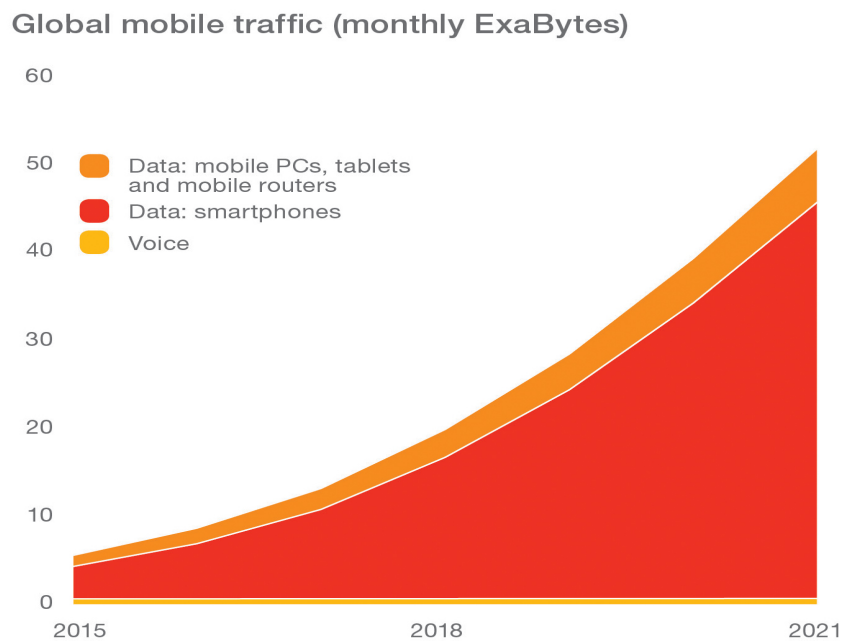
El concepto de *sistema de comunicación celular* surgió en la búsqueda de una solución al problema de congestión espectral y capacidad de usuarios de los primeros sistemas de comunicación inalámbrica, en los que existía un único transmisor de alta potencia sobre toda la región de cobertura. La idea fue dividir el área de servicio en pequeñas áreas denominadas *células*, que compuestas de una estación base con un transmisor de baja potencia y operando con una porción del espectro disponible, incrementan la capacidad del sistema sin incurrir en mayores cambios tecnológicos<sup>4</sup>. Considérese el escenario de una célula cuya estación base tiene un área de cobertura  $A$  ( $Km^2$ ) sobre la cual existe una densidad de usuarios  $U$  (usuarios/ $Km^2$ ) que genera un tráfico de datos  $T$  (bits/s/usuario). Para satisfacer esta demanda el sistema debe contar con una tecnología cuya eficiencia espectral  $SE$  (bits/s/Hz) le permita explotar al máximo el ancho de banda  $BW$  (Hz) asignado para su operación, de manera que cumpla la condición:

$$BW \times \frac{SE}{A} \geq U \times T \quad (1)$$

de donde se infiere que ante un eventual aumento en la demanda de datos del sistema se pueden contemplar tres opciones para garantizar el servicio: aumentar  $BW$ ,

<sup>4</sup>T. S. Rappaport. *Wireless Communications: Principles and Practice*. Prentice Hall communications engineering and emerging technologies series. Dorling Kindersley, 2009.

**Figura 2:** Tráfico de datos móviles a nivel mundial.



Fuente: Ericsson. *Ericsson Mobility Report*. 2015.

lo que significa un mayor uso del espectro radioeléctrico, el cual es un recurso limitado y costoso; reducir  $A$  por medio del despliegue de más estaciones base sobre el área de cobertura; y/o aumentar  $SE$  mediante la estandarización de tecnologías más eficientes. Si se traslada esta situación a las proporciones de la actualidad, donde el tráfico de datos móviles aumentará de 5 a 51 EB por mes durante los próximos seis años como se muestra en la figura 2, se hace notoria la necesidad de aumentar la capacidad del sistema a través de nuevas tecnologías que garanticen un mayor aprovechamiento de los recursos existentes. La tecnología MIMO se enfoca en el aumento de la eficiencia espectral mediante el uso de múltiples antenas en el transmisor y receptor. Este tipo de transmisión aprovecha la técnica de diversidad para garantizar la fiabilidad de la comunicación y la ganancia de multiplexación espacial para enviar múltiples cadenas de datos, aumentando así la capacidad del sistema. Con este principio se desarrollan los sistemas MIMO Masivo, los cuales disponen de estaciones base equipadas con un gran número de antenas distribuidas que sirven a muchos usuarios en un mismo recurso de tiempo-frecuencia. La ganancia de diversidad y multiplexación permite mejorar la tasa de transmisión de datos y la eficiencia de energía, un aspecto importante a nivel ambiental: de acuerdo a Ericsson<sup>5</sup> se espera mejorar la eficiencia de energía de las redes móviles de un promedio de 2 kWh por gigabyte transmitido, en 2015, a un promedio de 0.25 kWh para el 2021. En general, cuando se utilizan grandes arreglos

<sup>5</sup>Ericsson, *Ericsson Mobility Report*.

de antenas en la estación base, los vectores de canal entre los usuarios y la estación base son prácticamente ortogonales haciendo favorable la mayoría de escenarios de propagación, por lo que el procesamiento lineal es viable y no es necesario recurrir a técnicas de tratamiento más complejas<sup>6</sup>.

Este trabajo se centra en el estudio y análisis del desempeño de las técnicas de precodificación lineal más aceptadas sobre el enlace descendente de los sistemas MIMO Masivo. En concreto, los precodificadores basados en mínimo error cuadrático medio (MMSE, Minimum Mean Square Error (Mínimo Error Cuadrático Medio)), forzamiento a cero (ZF, Zero Forcing (Forzamiento a Cero)) y transmisión con relación máxima (MRT, Maximum Ratio Transmission (Transmisión con Relación Máxima)) son comparados en términos de tasa de transmisión alcanzable, eficiencia espectral y eficiencia de energía.

---

<sup>6</sup>T. L. Marzetta. “Noncooperative Cellular Wireless with Unlimited Numbers of Base Station Antennas”. En: *IEEE Transactions on Wireless Communications* 9.11 (2010), págs. 3590-3600.



# Parte I

## **SISTEMAS MIMO Y MIMO MASIVO**

# 1. SISTEMAS MIMO

Los sistemas MIMO convencionales han sido ampliamente expuestos en numerosas investigaciones, por lo que este capítulo constituye una breve mención de sus características más significativas en relación al enlace descendente en un sistema celular.

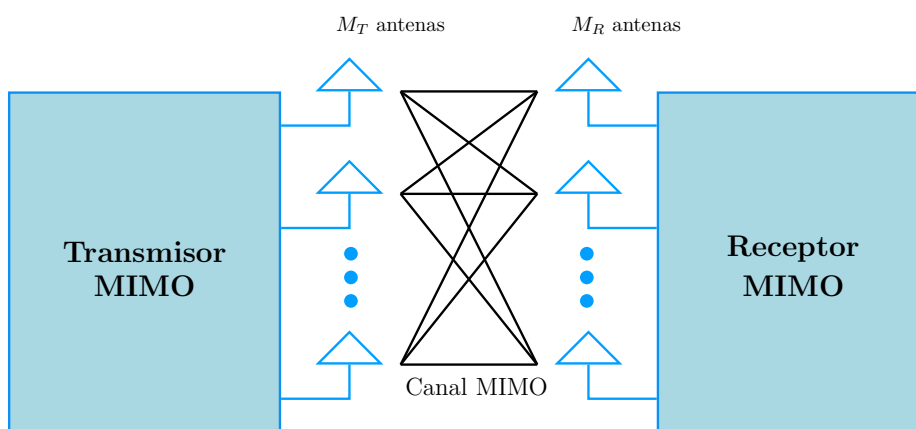
## 1.1. SU-MIMO

MIMO con Único Usuario (SU-MIMO) hace referencia a las estructuras con varias antenas que utilizan los recursos de red para mejorar la capacidad del enlace entre la estación base y un único usuario. Con este fin habilita  $L = \min(M_T, M_R)$  caminos paralelos y desacoplados entre sí, en donde  $M_T$  y  $M_R$  corresponden al número de antenas en transmisión y recepción respectivamente, véase la figura 3. De acuerdo a<sup>7</sup> la capacidad del canal bajo ciertas condiciones puede expresarse conforme al teorema de capacidad de Shannon:

$$C = L \cdot B \cdot \log_2(1 + \gamma) \quad \text{bits/s} \quad (2)$$

siendo  $B$  el ancho de banda y  $\gamma = \text{SNR}$  la relación señal a ruido en la entrada del receptor. En consecuencia, la capacidad aumenta linealmente con el número de antenas.

**Figura 3:** Estructura MIMO con Único Usuario.

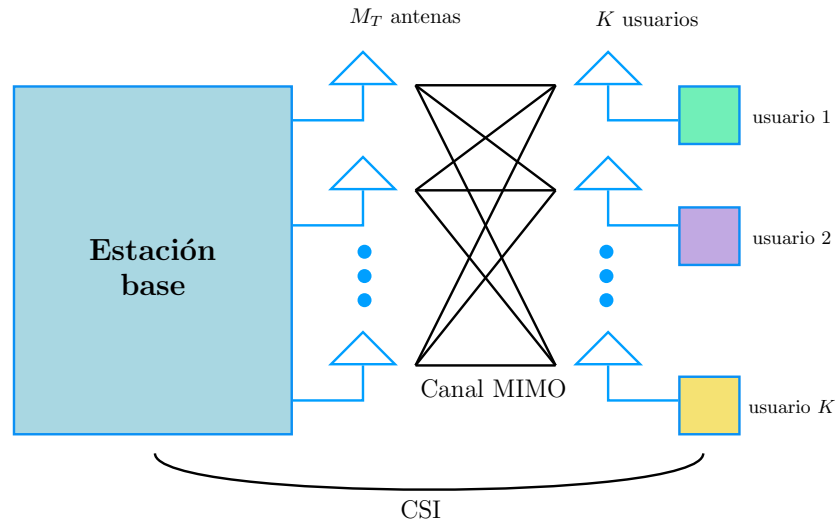


<sup>7</sup>R. Comes y F. Vodafone. *LTE: nuevas tendencias en comunicaciones móviles*. Fundación Vodafone España, 2010.

## 1.2. MU-MIMO

MIMO con Múltiples Usuarios (MU-MIMO) da un paso hacia adelante en términos de multiplexación espacial. En este caso, la estructura de antenas no se limita a transmitir señales a un único usuario sino que establece comunicación con un número de usuarios ( $K$ ) que comparten la misma banda de frecuencia, como se ilustra en la figura 4. La posible existencia de canales desacoplados o no interrelacionados entre la estación base y cada uno de los usuarios es aprovechada para transmitir diferentes flujos de datos simultáneamente. La información del estado del canal (CSI, Channel State Information (Información de Estado del Canal)) o la matriz de propagación vista por cada usuario receptor es necesaria para alcanzar la máxima capacidad del sistema<sup>8</sup>. En conclusión, SU-MIMO aumenta la capacidad de un único enlace mientras que MU-MIMO incrementa la capacidad de la célula, la cual será equivalente a la suma de las capacidades de los  $K$  usuarios.

**Figura 4:** Estructura MIMO con Múltiples Usuarios en enlace descendente.



Por facilidad de procesamiento se consideró una sola antena por usuario receptor en LTE. Sin embargo, recientemente se habilitó la posibilidad de utilizar más antenas en recepción para ganar diversidad a costa de una mayor complejidad en la gestión de la estructura. En general, MU-MIMO presenta un buen desempeño incluso con receptores de una sola antena, ofreciendo además la oportunidad de elegir los usuarios que presenten mejor estado del canal (CSI) para formar parte de la estructura en un momento determinado<sup>9</sup>. Esto garantiza obtener la máxima capacidad del sistema y a la vez facilita la multiplexación de los usuarios.

<sup>8</sup>Comes y Vodafone, *LTE: nuevas tendencias en comunicaciones móviles*.

<sup>9</sup>Ibíd.

## 2. SISTEMAS MIMO MASIVO

Un sistema MIMO Masivo –también conocido como *Full-Dimension MIMO*, *Very Large MIMO*, *Large-Scale Antenna Systems*, *Hyper MIMO* y *ARGOS*– es en esencia un tipo de sistema MIMO con Múltiples Usuarios en donde el número de antenas presente en la estación base y el número de usuarios es grande. Este sistema permite establecer varias comunicaciones de forma paralela; al mismo instante y utilizando los mismos recursos de frecuencia. Se consideran estaciones bases equipadas con cientos o miles de antenas que transmiten simultáneamente a decenas o cientos de usuarios. Algunas de las ventajas y potencialidades de MIMO Masivo destacadas en<sup>10,11,12</sup> son:

- *Gran eficiencia espectral*: con  $M$  antenas en la estación base enviando flujos de datos independientes a  $K$  usuarios en el mismo espectro de frecuencia, se puede obtener una ganancia de multiplexación de mín  $(M, K)$ .
- *Alta fiabilidad de la comunicación*: el gran número de trayectorias que genera el arreglo de antenas de la estación base facilita la propagación de las señales. Esta ganancia de diversidad es de orden  $M$ .
- *Alta eficiencia de energía*: la estación base puede enfocar la energía hacia la dirección donde se localizan los usuarios, por lo que la potencia de transmisión es mejor aprovechada e incluso puede reducirse.
- *Baja complejidad de procesamiento*: el uso de un gran número de antenas respecto al número de usuarios produce un escenario de propagación favorable, en donde los vectores de canal entre cada usuario y la estación base son ortogonales. En consecuencia, es posible utilizar procesamiento lineal para eliminar los efectos de ruido e interferencia.
- *Componentes de bajo costo*: tradicionalmente se utilizan costosos amplificadores de 50 W que, para el caso de MIMO Masivo, pueden reemplazarse por cientos de amplificadores de bajo costo con potencias del orden de mW.

---

<sup>10</sup>E. Larsson y col. “Massive MIMO for next generation wireless systems”. En: *Communications Magazine, IEEE* 52.2 (2014), págs. 186-195.

<sup>11</sup>H. Q. Ngo. *Performance Bounds for Very Large Multiuser MIMO Systems*. 2012.

<sup>12</sup>H. Q. Ngo. “Massive MIMO: Fundamentals and System Designs”. Tesis doct. Linköping University, The Institute of Technology, 2015, pág. 45.

## 2.1. ESTIMACIÓN DEL CANAL

La estación base utiliza la información del estado del canal (CSI) para detectar las señales provenientes de los usuarios y para precodificar las señales que debe enviarles. Así, durante un intervalo de coherencia de  $T$  símbolos en los que el canal es constante, el sistema debe tener la capacidad de estimar el canal y transmitir datos en enlace ascendente y enlace descendente. En LTE el canal es estimado por los usuarios y transmitido de vuelta a la estación base, un proceso que de aplicarse en MIMO Masivo sería ineficiente considerando el gran número de antenas con las que opera, pues no habría tiempo suficiente para realimentar el valor del CSI. En consecuencia, la complejidad y el tiempo que tome la fase de entrenamiento constituye un factor crítico en la capacidad de transmitir datos. En esta sección se explica por qué es preferible utilizar el modo de transmisión TDD en MIMO Masivo y cómo se llevaría a cabo la estimación del canal, la cual se considera perfecta para los intereses de este trabajo.

### 2.1.1. Sistemas en modo FDD

Los sistemas que operan en modo de duplexión por división de frecuencia (FDD) utilizan diferentes bandas de frecuencia para el enlace ascendente y descendente. Por esta razón, se hace necesario estimar el estado del canal para cada uno de los dos enlaces.

De acuerdo a<sup>13</sup>, para la transmisión en sentido descendente, la estación base necesita conocer el canal para precodificar los símbolos que van a enviarse. Por tanto, las  $M$  antenas envían  $M$  secuencias de entrenamiento ortogonales hacia los  $K$  usuarios para que éstos estimen el estado del canal de acuerdo a las secuencias recibidas y lo envíen de vuelta a la estación base. Esto requiere un mínimo de  $M$  usos de cada uno de los enlaces ascendente y descendente. Para la transmisión en sentido ascendente, la estación base requiere del CSI para decodificar las señales transmitidas por los usuarios. En este caso, los  $K$  usuarios transmitirán  $K$  secuencias de entrenamiento ortogonales hacia a la estación base, en donde se estimará el canal según las secuencias recibidas. Este proceso requiere de  $K$  usos del enlace ascendente.

Si se establece un mismo intervalo de coherencia  $T$  del canal para los dos enlaces, se requiere que  $M < T$  para el enlace descendente y que  $M + K < T$  para el enlace ascendente. Por tanto, esta segunda desigualdad constituye el valor crítico para el modo FDD, el cual depende tanto del número de usuarios como de antenas<sup>14</sup>.

---

<sup>13</sup>Ngo, “Massive MIMO: Fundamentals and System Designs”.

<sup>14</sup>Ibíd.

### 2.1.2. Sistemas en modo TDD

A diferencia del modo FDD, el duplexado por división en tiempo (TDD) utiliza el mismo espectro de frecuencia para el enlace ascendente y descendente. En consecuencia, los canales son recíprocos y facilitan la estimación del canal.

Continuando con la explicación de<sup>15</sup>, para la transmisión en sentido ascendente, los  $K$  usuarios envían  $K$  secuencias de entrenamiento ortogonales hacia la estación base, en donde son utilizadas para estimar el estado del canal. Esto requiere de  $K$  usos del enlace ascendente. Para la transmisión en sentido descendente, la estación base utiliza el CSI previamente calculado durante el enlace ascendente –gracias a la propiedad de reciprocidad del canal– para precodificar los símbolos que se van a transmitir. Finalmente, la estación base envía secuencias de entrenamiento para que cada usuario pueda estimar la ganancia efectiva del canal que le permita detectar las señales que le son enviadas. En este paso, se hacen  $K$  usos adicionales del canal.

En consecuencia, debe cumplirse que  $2K < T$ . Esto significa que en TDD el factor crítico depende del número de usuarios y es independiente del número de antenas. Además, es importante resaltar que la complejidad de la estimación se afronta en la estación base mas no en los terminales de los usuarios. Este no es el caso del modo FDD, donde además el factor crítico depende del número de antenas que para el caso de MIMO Masivo es elevado, limitando así el intervalo de tiempo disponible para la fase de transmisión. Por esta razón se prefiere la operación en modo TDD y se considera que en general existe un número de antenas mayor al de usuarios activos, es decir,  $M \gg K$ .

#### Fase de entrenamiento

La estimación del estado del canal se lleva a cabo de acuerdo a<sup>16</sup> mediante el siguiente esquema de entrenamiento. Considérese  $\tau$  el número de símbolos por intervalo de coherencia utilizado para la fase de entrenamiento. Los usuarios transmiten simultáneamente secuencias piloto ortogonales de longitud  $\tau$  hacia la estación base, lo cual requiere que  $\tau \geq K$ . La matriz de tamaño  $M \times \tau$  recibida puede expresarse como:

$$\mathbf{Y}_p = \sqrt{p_p} \mathbf{H} \mathbf{\Phi}^T + \mathbf{N}_p \quad (3)$$

en donde  $\mathbf{H}$  es la matriz de canal  $M \times K$  entre los usuarios y el arreglo de antenas en la estación base, cuyos elementos son complejos independientes e idénticamente distribuidos de forma gaussiana con media de cero y varianza unitaria, es decir, modelan únicamente los efectos de desvanecimiento Rayleigh de pequeña escala;  $\mathbf{\Phi}$  es la matriz  $\tau \times K$  que representa las secuencias de entrenamiento y que satisface la condición  $\mathbf{\Phi}^H \mathbf{\Phi} = \mathbf{I}_K$ ;  $\mathbf{N}_p \in \mathbb{C}^{M \times \tau}$  representa el ruido aditivo en la estación base, cuyos elementos son independientes e idénticamente distribuidos de forma gaussiana con media de cero

<sup>15</sup>Ngo, “Massive MIMO: Fundamentals and System Designs”.

<sup>16</sup>Ngo, *Performance Bounds for Very Large Multiuser MIMO Systems*.

y varianza unitaria; y donde  $p_p = \tau p_u$ , siendo  $p_u$  la potencia que transmite un usuario por cada símbolo. El canal puede estimarse a partir de la expresión:

$$\tilde{\mathbf{Y}}_p = \sqrt{p_p} \mathbf{H} + \mathbf{W} \quad (4)$$

donde  $\tilde{\mathbf{Y}}_p = \mathbf{Y}_p \Phi^*$  y en consecuencia  $\mathbf{W} = \mathbf{N}_p \Phi^*$ . Sean  $\mathbf{y}_k$  y  $\mathbf{w}_k$  las  $k$ -ésimas columnas de sus respectivas matrices  $\tilde{\mathbf{Y}}_p$  y  $\mathbf{W}$ , es posible notar la ecuación:

$$\tilde{\mathbf{y}}_{\rho,k} = \sqrt{p_p} \mathbf{h}_k + \mathbf{w}_k \quad (5)$$

a partir de la cual se pueden estimar las columnas de  $\mathbf{H}$ . Suponiendo que la estación base estima el canal utilizando la técnica de mínimo error cuadrático medio (MMSE):

$$\hat{\mathbf{h}}_k = \arg \min_{\hat{\mathbf{h}}_k \in \mathbb{C}^M} \mathbb{E}_{\mathbf{h}_k, \tilde{\mathbf{y}}_{\rho,k}} \left\{ \left\| \hat{\mathbf{h}}_k - \mathbf{h}_k \right\|^2 \right\} \quad (6)$$

La estimación del canal  $\mathbf{h}_k$  resulta:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{h}}_k &= \frac{\sqrt{p_p}}{p_p + 1} \tilde{\mathbf{y}}_{\rho,k} \\ &= \frac{p_p}{p_p + 1} \mathbf{h}_k + \frac{\sqrt{p_p}}{p_p + 1} \mathbf{w}_k \end{aligned} \quad (7)$$

## 2.2. TRANSMISIÓN ASCENDENTE

A modo explicativo, se generaliza el esquema del enlace ascendente utilizado en la estimación de canal que se expuso en la sección anterior. Durante la transmisión en sentido ascendente,  $K$  usuarios envían señales a la estación base de forma simultánea. Sea  $x_k$  la señal transmitida por el  $k$ -ésimo usuario, el vector  $M \times 1$  recibido en la estación base es la combinación de todas las señales enviadas<sup>17</sup>:

$$\begin{aligned} \mathbf{y} &= \sqrt{p_u} \sum_{k=1}^K \mathbf{h}_k x_k + \mathbf{n} \\ &= \sqrt{p_u} \mathbf{H} \mathbf{x} + \mathbf{n} \end{aligned} \quad (8)$$

donde  $p_u$  es la potencia promedio transmitida por cada usuario;  $\mathbf{h}_k \in \mathbb{C}^{M \times 1}$  es el vector de canal entre el  $k$ -ésimo usuario y la estación base;  $\mathbf{n} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$  es el vector de ruido aditivo;  $\mathbf{H} = [h_1 \dots h_K]$  y  $\mathbf{x} = [x_1 \dots x_K]^T$ . Se considera que los elementos de  $\mathbf{h}_k$  y  $\mathbf{n}$  son independientes e idénticamente distribuidos de forma gaussiana con media de cero y varianza unitaria. A partir del vector recibido y con conocimiento del estado del canal (CSI), la estación base está en capacidad de detectar coherentemente la señales provenientes de los usuarios.

<sup>17</sup>Ngo, *Performance Bounds for Very Large Multiuser MIMO Systems*.

## 2.3. TRANSMISIÓN DESCENDENTE

Sea  $\mathbf{x} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$  el vector que representa la señal transmitida por el arreglo de antenas en la estación base. La señal recibida por el  $k$ -ésimo usuario puede notarse como<sup>18</sup>:

$$y_k = \sqrt{p_d} \mathbf{h}_k^T \mathbf{x} + n_k \quad (9)$$

en donde  $\sqrt{p_d}$  representa la potencia promedio de transmisión;  $\mathbf{h}_k \in \mathbb{C}^{M \times 1}$  es el vector de canal entre el  $k$ -ésimo usuario y la estación base;  $n_k$  es el ruido aditivo en el  $k$ -ésimo usuario, el cual sigue una distribución gaussiana con media de cero y varianza unitaria. El conjunto de señales recibidas por los  $K$  usuarios activos se representa por el vector:

$$\mathbf{y} = \sqrt{p_d} \mathbf{H}^T \mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (10)$$

el cual es equivalente a:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_K \end{bmatrix} = \sqrt{p_d} \begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{1,2} & \cdots & h_{1,K} \\ h_{2,1} & h_{2,2} & \cdots & h_{2,K} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{M,1} & h_{M,2} & \cdots & h_{M,K} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_K \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ \vdots \\ n_K \end{bmatrix}$$

La estación base utiliza la información del estado del canal (CSI) obtenida durante la fase de entrenamiento para procesar la señales antes de transmitirlos a los usuarios. A continuación se explica el proceso de precodificación lineal.

## 2.4. PRECODIFICACIÓN LINEAL

En la figura 5 se ilustra el esquema de transmisión descendente de MIMO Masivo utilizando precodificación lineal. La señal  $\mathbf{x}$  transmitida desde las  $M$  antenas es tratada como una combinación lineal de los símbolos destinados a los  $K$  usuarios. Sea  $s_k$  el símbolo con destino al  $k$ -ésimo usuario que satisface  $\mathbb{E}\{|s_k|^2\} = 1$ , y  $\mathbf{A} \in \mathbb{C}^{M \times K}$  la matriz de precodificación lineal, que es función de la matriz de canal  $\mathbf{H}$ , el vector linealmente precodificado es<sup>19</sup>:

$$\mathbf{x} = \sqrt{p_d} \mathbf{A} \mathbf{s} \quad (11)$$

en donde  $\mathbf{s} = [s_1 \dots s_K]^T$  y  $p_d$  es la potencia promedio de transmisión de la estación base. Para satisfacer esta restricción de potencia, la matriz de precodificación  $\mathbf{A}$  debe

<sup>18</sup>Ngo, "Massive MIMO: Fundamentals and System Designs".

<sup>19</sup>H. Q. Ngo, E. Larsson y T. Marzetta. "Massive MU-MIMO downlink TDD systems with linear precoding and downlink pilots". *En: Communication, Control, and Computing (Allerton), 2013 51st Annual Allerton Conference on.* 2013, págs. 293-298.

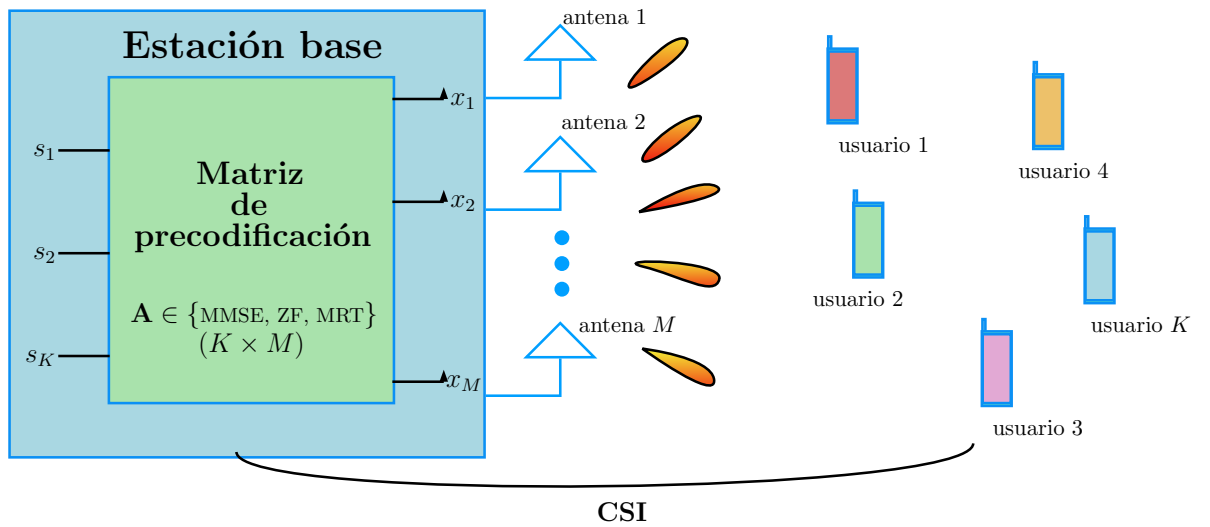


satisfacer  $\mathbb{E} \{ \|\mathbf{x}\|^2 \} = p_d$ , o bien  $\mathbb{E} \{ \text{tr}(\mathbf{A}\mathbf{A}^H) \} = 1$ . Tomando como referencia la ecuación 10, el conjunto de señales recibidas por los  $K$  usuarios se denota:

$$\begin{aligned} \mathbf{y} &= \mathbf{H}^T \mathbf{x} + \mathbf{n} \\ &= \sqrt{p_d} \mathbf{H}^T \mathbf{A} \mathbf{s} + \mathbf{n} \end{aligned} \quad (12)$$

Las técnicas de precodificación lineal objeto de estudio se presentan a continuación.

**Figura 5:** Precodificación lineal en MIMO Masivo.



### 2.4.1. Precodificación MMSE

La técnica de precodificación por mínimo error cuadrático medio (MMSE) asume que existirá interferencia entre usuarios por lo que su estrategia consiste en minimizar la potencia media de la señal de error, es decir, la diferencia entre la señal transmitida por la estación base y la señal estimada por el usuario, con un criterio de error cuadrático mínimo. La matriz de precodificación que cumple con esta característica es<sup>20</sup>:

$$\mathbf{A}_{MMSE} = \frac{1}{\beta_{MMSE}} \mathbf{H}^* \underbrace{\left( \mathbf{H}^T \mathbf{H}^* + \frac{K}{p_d} \mathbf{I}_K \right)^{-1}}_{\mathbf{A}} \quad (13)$$

en donde  $\mathbf{H}$  representa la matriz de canal,  $\mathbf{I}_K$  la matriz identidad de tamaño  $K$ ,  $p_d$  la potencia promedio de transmisión de la estación base,  $K$  el número de usuarios y

<sup>20</sup>Ngo, “Massive MIMO: Fundamentals and System Designs”.

$\beta_{MMSE}$  la constante que satisface la restricción de potencia  $\mathbb{E} \{ \text{tr}(\mathbf{A}\mathbf{A}^H) \} = 1$ , y que es equivalente a la expresión:

$$\beta_{MMSE} = \sqrt{\text{tr}(\mathbf{A}\mathbf{A}^H)} = \sqrt{\text{tr} \left( \mathbf{H}^T \mathbf{H}^* \left( \mathbf{H}^T \mathbf{H}^* + \frac{K}{p_d} \mathbf{I}_K \right)^{-2} \right)} \quad (14)$$

Obsérvese que el cociente  $\frac{K}{p_d}$  es el valor que maximiza la relación señal a ruido más interferencia (SINR) en cada usuario receptor, por lo que se espera que el precodificador MMSE tenga un óptimo desempeño<sup>21</sup>. Sin embargo, es preciso señalar que presenta una alta complejidad computacional, un factor que podría convertirse en una desventaja con relación a la velocidad de procesamiento y el consumo de energía de los dispositivos.

### 2.4.2. Precodificación ZF

La estrategia de precodificación con forzamiento a cero (ZF) anula completamente la interferencia entre usuarios mediante la proyección de las señales a transmitir sobre el complemento ortogonal de las componentes causantes de la interferencia entre usuarios. Considérense  $\mathbf{h}_k$  y  $\mathbf{a}_{ZF,k}$  las  $k$ -ésimas columnas de la matriz de canal  $\mathbf{H}$  y la matriz de precodificación  $\mathbf{A}_{ZF}$  respectivamente. El proceso de precodificación debe ser tal que<sup>22</sup>:

$$\begin{cases} \mathbf{h}_k^T \mathbf{a}_{ZF,k} \neq 0 \\ \mathbf{h}_k^T \mathbf{a}_{ZF,k'} = 0, \text{ siendo } k' \neq k. \end{cases}$$

por lo que las componentes de usuarios diferentes al de interés se fuerzan a cero. La matriz de precodificación que satisface esta propiedad es la pseudo-inversa del canal<sup>23</sup>:

$$\mathbf{A}_{ZF} = \frac{1}{\beta_{ZF}} \underbrace{\mathbf{H}^* (\mathbf{H}^T \mathbf{H}^*)^{-1}}_{\mathbf{A}} \quad (15)$$

en donde  $\mathbf{H}$  representa la matriz de canal y  $\beta_{ZF}$  la constante que satisface la restricción de potencia  $\mathbb{E} \{ \text{tr}(\mathbf{A}\mathbf{A}^H) \} = 1$ , la cual equivale a:

$$\beta_{ZF} = \sqrt{\text{tr}(\mathbf{A}\mathbf{A}^H)} = \sqrt{\text{tr} \left( \mathbf{H}^T \mathbf{H}^* (\mathbf{H}^T \mathbf{H}^*)^{-2} \right)} \quad (16)$$

Esta técnica se caracteriza por presentar un buen rendimiento en escenarios de propagación limitados por señales de interferencia. A partir de la ecuación 13 puede señalarse que la estrategia ZF se aproxima a MMSE cuando la potencia de transmisión tiende a infinito ( $p_d \rightarrow \infty$ ). En efecto, considerando que no tiene en cuenta la existencia de ruido se prefiere en situaciones donde se transmite con alta relación señal a ruido (SNR). Además, su complejidad computacional es menor comparada con la precodificación basada en MMSE.

<sup>21</sup>Comes y Vodafone, *LTE: nuevas tendencias en comunicaciones móviles*.

<sup>22</sup>Ngo, "Massive MIMO: Fundamentals and System Designs".

<sup>23</sup>Ibíd.

### 2.4.3. Precodificación MRT

La técnica de transmisión con relación máxima (MRT) se caracteriza por maximizar la relación señal a ruido (SNR) con la que transmite la estación base. Cuanto más fuerte es la ganancia que presenta un determinado canal de propagación entre la estación base y un usuario determinado, mayor es la energía que se asigna a la señal que se transmite por esta trayectoria. Esta estrategia presenta un buen rendimiento en escenarios ruidosos y su matriz de precodificación es la de menor complejidad computacional<sup>24</sup>:

$$\mathbf{A}_{MRT} = \frac{1}{\beta_{MRT}} \underbrace{\mathbf{H}^*}_{\mathbf{A}} \quad (17)$$

en donde  $\mathbf{H}$  representa la matriz del canal de propagación y  $\beta_{MRT}$  la constante que satisface la restricción de potencia  $\mathbb{E} \{ \text{tr}(\mathbf{A}\mathbf{A}^H) \} = 1$ , que para este caso resulta:

$$\beta_{MRT} = \sqrt{\text{tr}(\mathbf{A}\mathbf{A}^H)} = \sqrt{\text{tr}(\mathbf{H}^T \mathbf{H}^*)} \quad (18)$$

Con base en la ecuación 13 se puede decir que la técnica de precodificación MRT se aproxima a MMSE cuando la potencia promedio de transmisión del sistema tiende a cero ( $p_d \rightarrow 0$ ). Su desventaja es no considerar la posible existencia de interferencia entre los usuarios del sistema, razón por la que presenta un bajo rendimiento sobre escenarios limitados por este fenómeno.

---

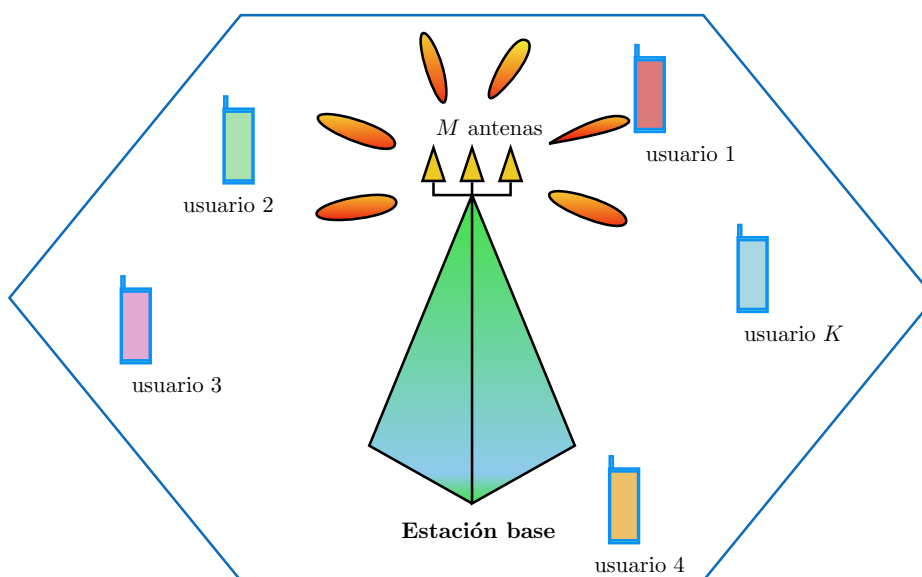
<sup>24</sup>Ngo, “Massive MIMO: Fundamentals and System Designs”.

## Parte II

# EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE MIMO MASIVO

### 3. MODELO DEL SISTEMA

Figura 6: Modelo del sistema MIMO Masivo.



Se considera un sistema MU-MIMO constituido por una estación base equipada con  $M$  antenas y  $K$  usuarios activos, como se ilustra en la figura 6. Por facilidad, el análisis se limita al entorno de una célula y a usuarios con terminales de una sola antena. Se asume que los  $K$  usuarios comparten el mismo recurso en tiempo-frecuencia y que existen condiciones de propagación favorable debido a que  $M \gg K$ .

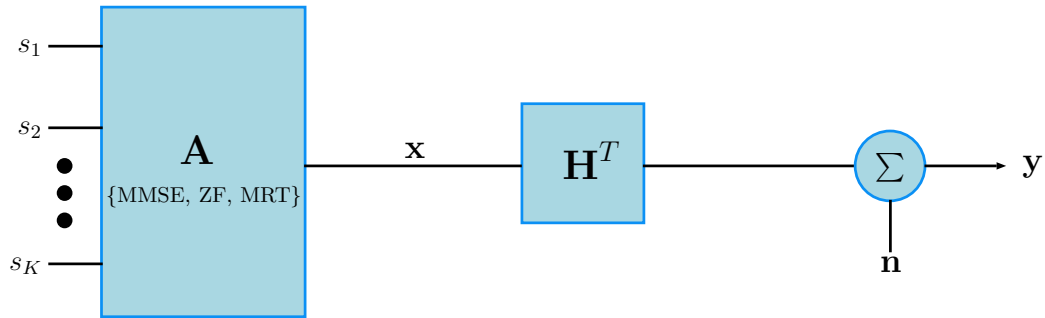
El modelo del canal de comunicación incluye los efectos de desvanecimiento Rayleigh de pequeña escala e ignora los de gran escala. Se considera que el canal permanece constante durante un intervalo de coherencia de  $T$  símbolos y que se obtiene en la estación base durante la fase de entrenamiento que utiliza el protocolo de duplexación por división de tiempo (TDD), aprovechando la propiedad de reciprocidad del canal. De esta manera, la transmisión en enlace descendente tendrá dos fases: la de entrenamiento y la de transmisión de datos. Durante la fase de entrenamiento la estación base obtiene la información del estado del canal (CSI) de cada uno de los  $K$  usuarios a partir de la secuencia de entrenamiento recibida mediante el enlace ascendente. Posteriormente,

la estación base utiliza este valor de CSI y un esquema de precodificación lineal para procesar los datos que se transmiten. Con el propósito de evaluar el rendimiento de las técnicas de precodificación lineal MMSE, ZF y MRT, se asume que la estación base tiene perfecto conocimiento del estado del canal y que por tanto no influye negativamente sobre este proceso.

### 3.1. IMPLEMENTACIÓN

El sistema es implementado en la herramienta de software matemático MATLAB, tomando como referencia el diagrama de bloques del modelo del sistema expuesto anteriormente, el cual es derivado de la ecuación 12 y se ilustra en la figura 7:

**Figura 7:** Diagrama de bloques del sistema.



en donde  $[s_1, s_2 \dots s_K]$  son los símbolos destinados a los  $K$  usuarios y que corresponden a variables aleatorias independientes e idénticamente distribuidas de forma gaussiana;  $\mathbf{A} \in \mathbb{C}^{M \times K}$  representa la matriz de precodificación lineal que según el precodificador utilizado se obtiene de las ecuaciones 13, 15 y 17;  $\mathbf{x}$  es el vector linealmente precodificado resultante;  $\mathbf{H}^T \in \mathbb{C}^{M \times K}$  la transpuesta de la matriz de canal cuyos elementos son complejos independientes e idénticamente distribuidos de forma gaussiana con media de cero y varianza unitaria, es decir, se aproximan a un canal Rayleigh con desvanecimiento plano de pequeña escala;  $\mathbf{n} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$  el ruido gaussiano blanco aditivo (AWGN).

Siguiendo la metodología de simulación Monte Carlo<sup>25</sup> se realizan 10,000 realizaciones del canal para aproximar el operador esperanza o valor matemático de los parámetros de evaluación que serán descritos en la siguiente sección para cada valor de potencia de transmisión o SNR de la estación base en el rango de -20 y 30 dB. Para los casos en que el número de antenas es superior a 100, se hacen necesarias hasta 100,000 realizaciones para obtener resultados confiables.

<sup>25</sup>W. Tranter. *Principles of Communication Systems Simulation with Wireless Applications*. Prentice Hall communications engineering and emerging technologies series. Prentice Hall Professional Technical Reference, 2004.

## 4. PARÁMETROS CONSIDERADOS EN LA EVALUACIÓN DE MIMO MASIVO

Los sistemas MIMO Masivo han sido propuestos para cumplir con los requerimientos de la quinta generación de telefonía móvil (5G). Con el ánimo de estudiar su potencialidad, el rendimiento del sistema es evaluado a partir de la cuantificación de la tasa de transmisión de datos alcanzable, la eficiencia espectral y la eficiencia de energía sobre diferentes escenarios de simulación como se explicará en este capítulo.

Los requerimientos y capacidades de 5G pueden resumirse como sigue<sup>26,27</sup>:

- *Capacidad masiva*: de 10 a 100 veces más dispositivos conectados. 10000 veces más tráfico de datos.
- *Alta tasa de transmisión de datos*: tasas pico superiores a 10 Gbits/s en escenarios interiores, más de 100 Mbits/s para escenarios urbanos y de mínimo 10 Mbits/s para zonas rurales.
- *Muy baja latencia*: menor o igual a 1 ms.
- *Ultra alta fiabilidad y disponibilidad*.
- *Alto rendimiento energético de la red*.
- *Dispositivos de bajo costo y consumo de energía*.

### 4.1. TASA DE TRANSMISIÓN ALCANZABLE

La máxima tasa de transmisión de datos es derivada del teorema de capacidad de Shannon para canales afectados por ruido gaussiano blanco aditivo (AWGN), considerando que todos los parámetros son procesos aleatorios que siguen una distribución gaussiana y que el canal es de naturaleza ergódica, es decir, presenta desvanecimiento pero existe una gran cantidad de realizaciones del canal que permiten calcular la capacidad como la esperanza matemática o valor esperado de la capacidad

---

<sup>26</sup>Ericsson. *5G Radio Access*. 2015.

<sup>27</sup>Nokia. *5G Uses cases and requirements*. 2014.

instantánea. Si se tiene en cuenta que MIMO Masivo permite múltiples comunicaciones de forma paralela, los diferentes canales establecidos entre la estación base y los usuarios pueden considerarse independientes y, en consecuencia, la capacidad total del sistema estará dada por la sumatoria de las tasas de transmisión individuales. En correspondencia con lo anterior, la tasa de transmisión de datos en bits/s/Hz para el k-ésimo usuario puede notarse:

$$R_k = \mathbb{E} [\log_2 (1 + \text{SINR}_k)] \quad (19)$$

en donde  $\text{SINR}_k$  es la relación señal a ruido más interferencia del k-ésimo usuario, la cual se deriva enseguida a partir de la ecuación 12. Sean  $\mathbf{h}_k$  y  $\mathbf{a}_k$  las k-ésimas columnas de sus respectivas matrices  $\mathbf{H}$  y  $\mathbf{A}$ ; y  $y_k$  y  $s_k$  los k-ésimos elementos de los vectores  $\mathbf{y}$  y  $\mathbf{s}$ , respectivamente. La señal recibida por el k-ésimo usuario es:

$$y_k = \underbrace{\sqrt{p_d} \mathbf{h}_k^T \mathbf{a}_k s_k}_{\text{señal deseada}} + \underbrace{\sqrt{p_d} \sum_{k' \neq k}^K \mathbf{h}_k^T \mathbf{a}_{k'} s_{k'}}_{\text{interferencia inter-usuarios}} + \underbrace{n_k}_{\text{ruido}} \quad (20)$$

Del primer término de la ecuación 20, el valor esperado de la señal deseada se expresa:

$$\mathbb{E} \left[ \left| \sqrt{p_d} \mathbf{h}_k^T \mathbf{a}_k s_k \right|^2 \right] = p_d |\mathbf{h}_k^T \mathbf{a}_k|^2 \mathbb{E} [|s_k|^2] \quad (21)$$

$$= p_d |\mathbf{h}_k^T \mathbf{a}_k|^2 \quad (22)$$

A partir del segundo y tercer término de la ecuación 20 se expresa el valor esperado de la interferencia inter-usuarios y el ruido:

$$\mathbb{E} \left[ \left| \sqrt{p_d} \sum_{k' \neq k}^K \mathbf{h}_k^T \mathbf{a}_{k'} s_{k'} + n_k \right|^2 \right] = p_d \sum_{k' \neq k}^K |\mathbf{h}_k^T \mathbf{a}_{k'}|^2 \mathbb{E} [|s_{k'}|^2] + \mathbb{E} [|n_k|^2] \quad (23)$$

$$= p_d \sum_{k' \neq k}^K |\mathbf{h}_k^T \mathbf{a}_{k'}|^2 + 1 \quad (24)$$

Por tanto, la relación señal a ruido más interferencia (SINR) del k-ésimo usuario está dada por:

$$\text{SINR}_k = \frac{|\mathbf{h}_k^T \mathbf{a}_k|^2}{\sum_{k' \neq k}^K |\mathbf{h}_k^T \mathbf{a}_{k'}|^2 + 1} \quad (25)$$



Introduciendo la ecuación 25 en la 19 se obtiene la expresión general para la tasa de transmisión alcanzable del  $k$ -ésimo usuario:

$$R_k = \mathbb{E} \left[ \log_2 \left( 1 + \frac{|\mathbf{h}_k^T \mathbf{a}_k|^2}{\sum_{k' \neq k}^K |\mathbf{h}_k^T \mathbf{a}_{k'}|^2 + 1} \right) \right] \quad (26)$$

## 4.2. EFICIENCIA ESPECTRAL

La eficiencia espectral del sistema corresponde a la tasa de transmisión de datos total alcanzada por los  $K$  usuarios activos. Para el sistema propuesto, en donde el CSI es perfecto, la eficiencia espectral en bits/s/Hz se define como<sup>28</sup>:

$$R_{P_{CSI}}^A = \sum_{k=1}^K R_k^A \quad (27)$$

en donde  $A \in \{\text{MMSE}, \text{ZF}, \text{MRT}\}$ , según el precodificador lineal que utilice la estación base para llevar a cabo la transmisión de datos y  $P_{CSI}$  significa Perfecto CSI.

## 4.3. EFICIENCIA DE ENERGÍA

La eficiencia de energía se define como la eficiencia espectral dividida por la potencia con que se realiza la transmisión. De este modo, siendo  $p_d$  la potencia promedio de transmisión de la estación base en julios por segundos (J/s), la eficiencia de energía en bits/J/Hz se puede notar<sup>29</sup>:

$$\eta_{P_{CSI}}^A = \frac{1}{p_d} R_{P_{CSI}}^A \quad (28)$$

en donde  $A \in \{\text{MMSE}, \text{ZF}, \text{MRT}\}$  y  $P_{CSI}$  significa Perfecto CSI. En general, un aumento de la eficiencia espectral está asociado con el incremento de la potencia de transmisión del sistema, lo que a su vez representa una disminución de la eficiencia de energía. Por tanto, existe un compromiso entre la eficiencia espectral y de energía que debe evaluarse.

---

<sup>28</sup>H. Q. Ngo, E. Larsson y T. Marzetta. "Energy and Spectral Efficiency of Very Large Multiuser MIMO Systems". *En: Communications, IEEE Transactions on* 61.4 (2013), págs. 1436-1449.

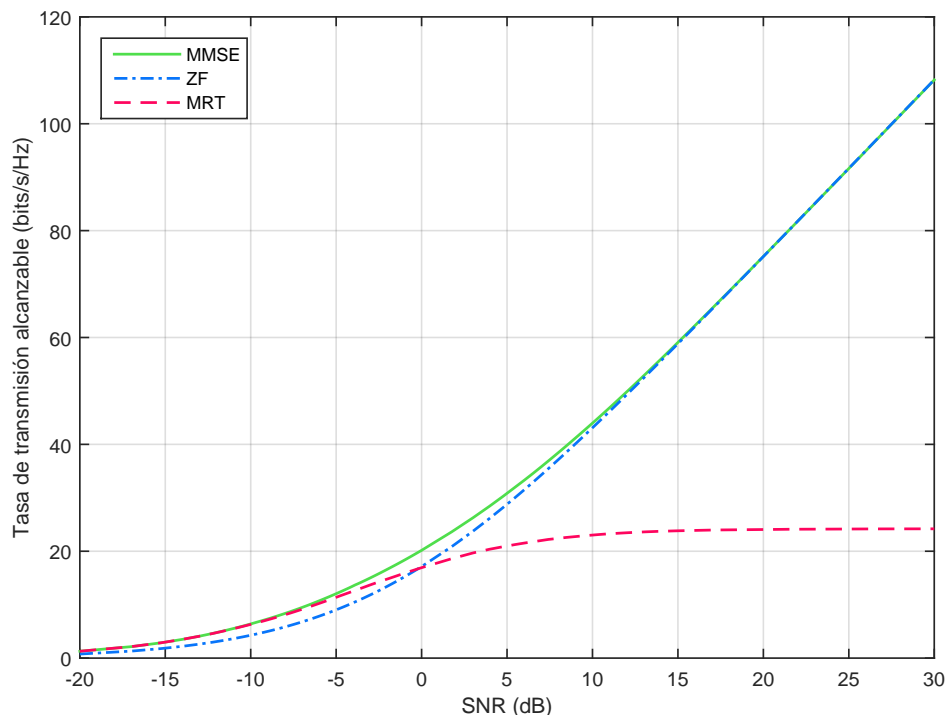
<sup>29</sup>Ibíd.

## 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 5.1. Escenario I

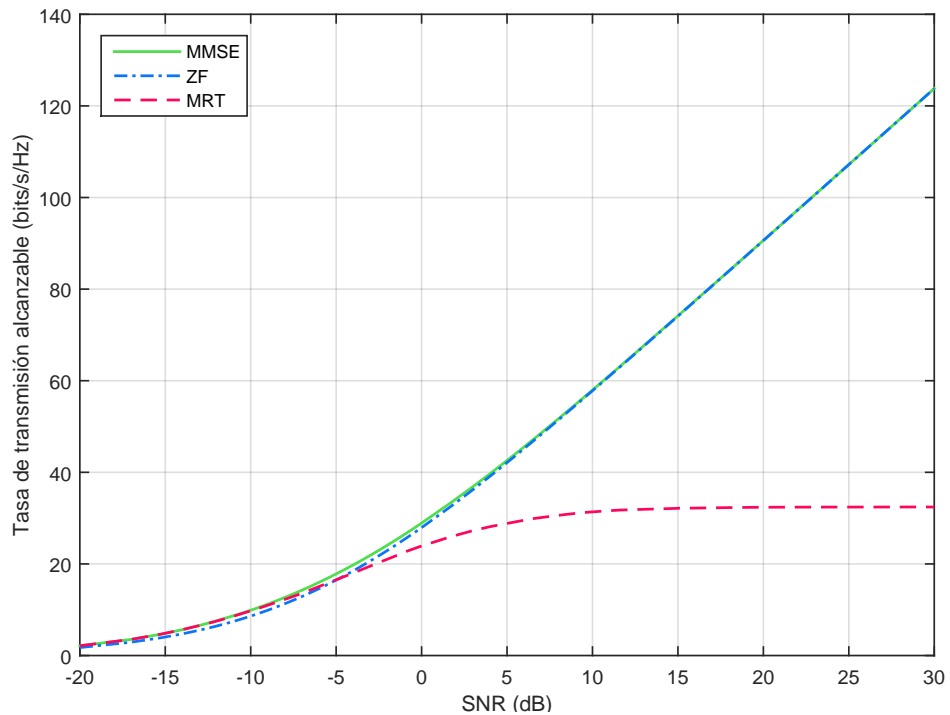
En este escenario se pretende evaluar la tasa de transmisión de datos alcanzable del sistema en bits/s/Hz para cada técnica de precodificación lineal, a medida que aumenta el número de antenas en la estación base. Con este propósito, considérese que el número de usuarios activos en la célula es  $K = 10$ , mientras que el número de antenas ( $M$ ) se duplica tomando valores de 20, 40 y 80. Los resultados de las simulaciones se muestran a continuación para potencias de transmisión en el rango de -20 a 30 dB.

**Figura 8:** Tasa de transmisión alcanzable con diferente SNR cuando  $M=20$  y  $K=10$ .



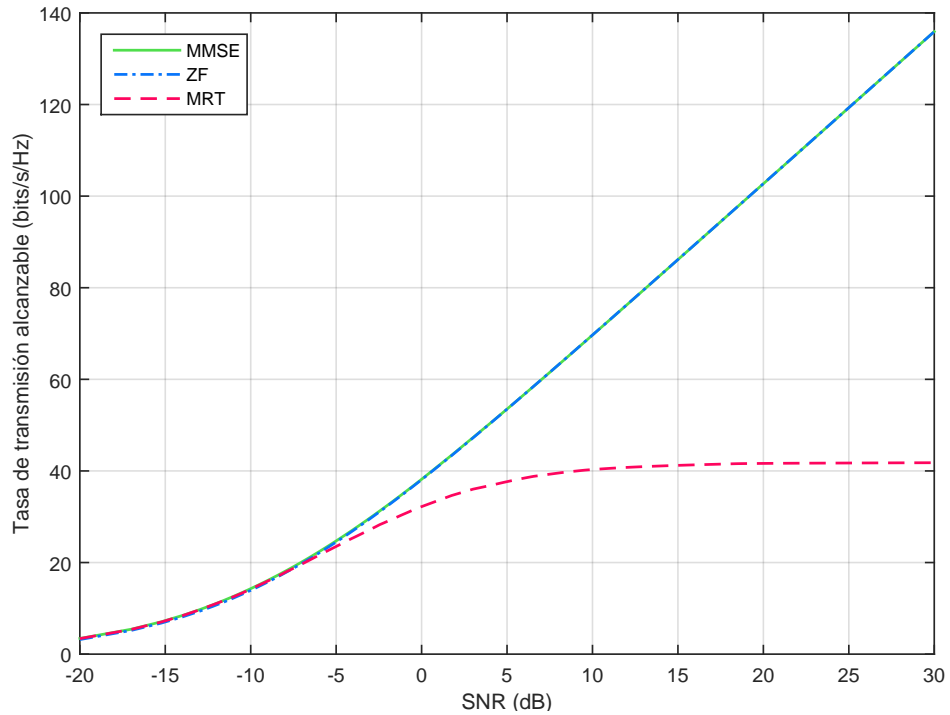
De acuerdo con los resultados de la figura 8, en donde  $M = 20$  y  $K = 10$ , el precodificador basado en MMSE presenta la mejor tasa de transmisión de datos a través de todo el rango de potencia considerado. Por otra parte, el precodificador MRT exhibe un buen desempeño a potencias bajas superando a ZF en el rango de -20 a 0 dB. Lo contrario ocurre a potencias más altas, en donde el precodificador ZF supera ampliamente a MRT y se acerca a MMSE a medida que aumenta la potencia de transmisión de la estación base.

**Figura 9:** Tasa de transmisión alcanzable con diferente SNR cuando  $M=40$  y  $K=10$ .



En la figura 9 se ha duplicado el número de antenas en la estación base a  $M = 40$ . En estas circunstancias, la tasa de transmisión de datos alcanzable aumenta en un orden del 35% a una potencia de transmisión de 10 dB: alrededor de 14 bits/s/Hz para las técnicas de precodificación MMSE y ZF, y 8 bits/s/Hz para MRT. Comparativamente, los precodificadores presentan un comportamiento similar al de la prueba anterior siendo MMSE el que domina a través de todo el rango de potencia, mientras que ZF se desempeña bien a potencias altas y MRT a potencias bajas. Sin embargo, debe advertirse que la diferencia entre el rendimiento de las técnicas de precodificación disminuyó por lo cual las curvas tienden a superponerse.

**Figura 10:** Tasa de transmisión alcanzable con diferente SNR cuando  $M=80$  y  $K=10$ .



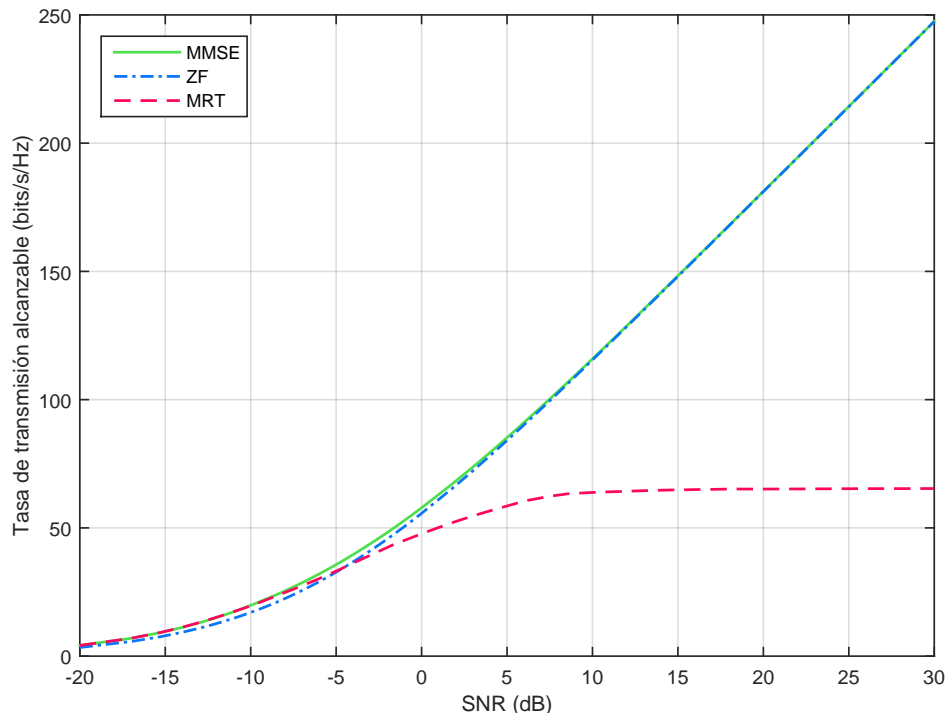
De la figura 10, en donde el número de antenas en la estación base se ha duplicado a  $M = 80$ , se destaca un aumento de la tasa de transmisión de datos del 20% a una potencia de 10 dB: cerca de 10 bits/s/Hz para las técnicas de precodificación MMSE y ZF, y 8 bits/s/Hz para MRT, respecto a la prueba inmediatamente anterior. El rendimiento del precodificador ZF mejora a tal punto que su curva se superpone con la correspondiente a MMSE prácticamente a través de todo el rango de potencia. En consecuencia, la técnica de precodificación ZF es viable para transmitir a baja potencia exclusivamente cuando el número de antenas en la estación base es mucho más grande que el de usuarios activos.

A partir de lo observado en las figuras 8, 9 y 10, se concluye que la tasa de transmisión de datos alcanzable por el sistema aumenta a medida que el número de antenas en la estación base se hace grande. Esto es debido a que las condiciones de propagación son favorables siempre que  $M \gg K$ , es decir, exista una gran ganancia de diversidad.

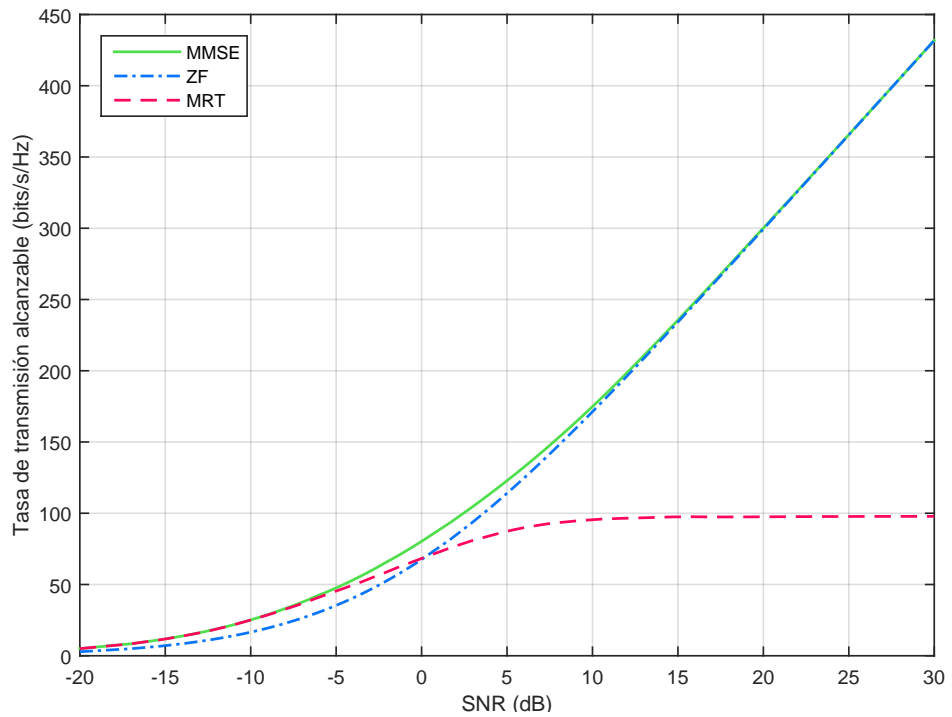
## 5.2. Escenario II

Ahora se evalúa la tasa de transmisión alcanzable del sistema para cada técnica de precodificación lineal, a medida que el número de usuarios activos aumenta. Considérese que la estación base tiene un número de antenas fijo  $M = 80$ , mientras que el número de usuarios ( $K$ ) toma valores de 20, 40, 60 y 75.

**Figura 11:** Tasa de transmisión alcanzable con diferente SNR cuando  $M=80$  y  $K=20$ .

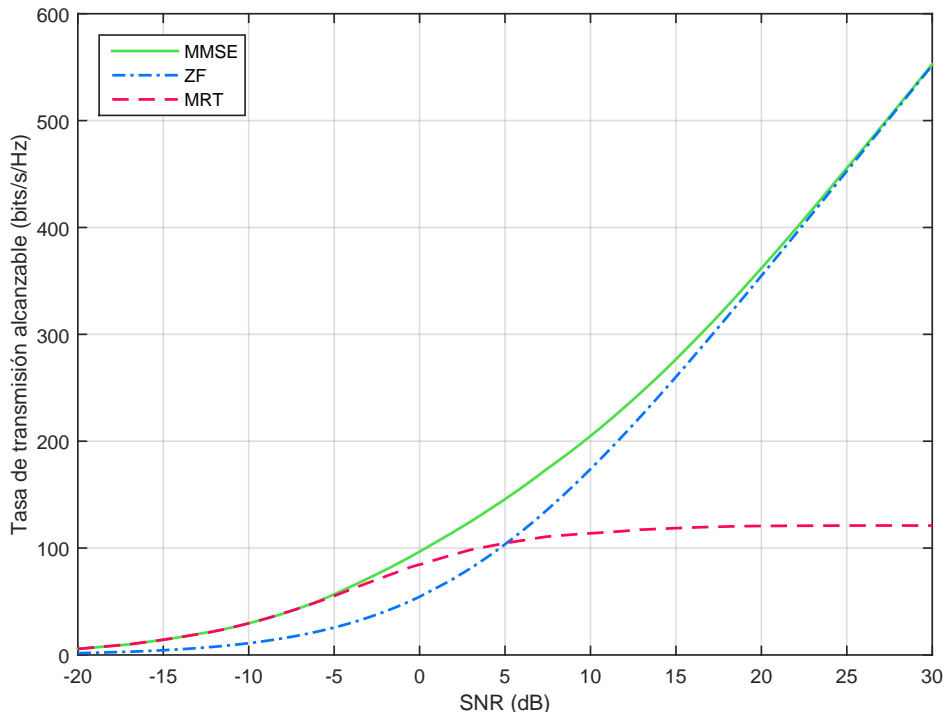


**Figura 12:** Tasa de transmisión alcanzable con diferente SNR cuando  $M=80$  y  $K=40$ .



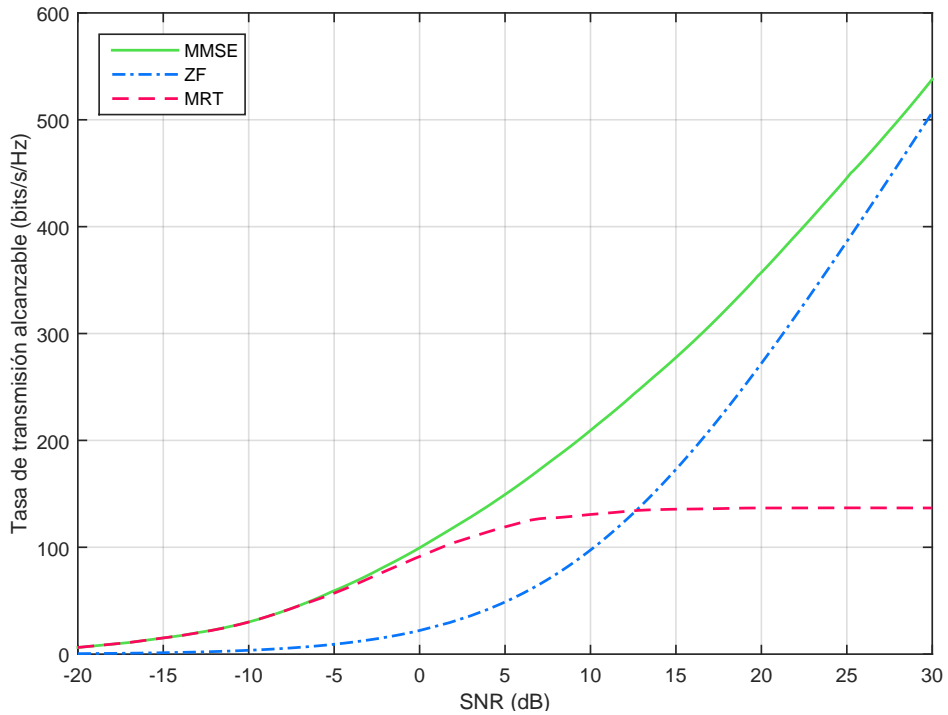
De acuerdo a los resultados de las figuras 11 y 12, al duplicar el número de usuarios activos de  $K = 20$  a  $K = 40$ , la tasa de transmisión de datos del sistema aumentó un 50% a una potencia de 10 dB: alrededor de 55 bits/s/Hz para las técnicas de precodificación lineal basadas en MMSE y ZF, y 30 bits/s/Hz para la basada en MRT. Este notable incremento en la tasa de transmisión de datos alcanzable es debido al aumento de la ganancia de multiplexación, la cual es equivalente al valor mínimo entre el número de usuarios activos y el número de antenas en la estación base:  $\min(M, K)$  para los sistemas MIMO con Múltiples Usuarios. En consecuencia, siempre que  $M > K$ , como es el caso habitual en los sistemas MIMO Masivo, la ganancia de multiplexación dependerá del número de usuarios activos en un momento determinado.

**Figura 13:** Tasa de transmisión alcanzable con diferente SNR cuando  $M=80$  y  $K=60$ .



En la figura 13 se han introducido  $K = 60$  usuarios al sistema. En estas circunstancias, el incremento en la tasa de transmisión de datos a una potencia de transmisión de 10 dB es del 17% (30 bits/s/Hz) para el precodificador MMSE, del 1.5% (2 bits/s/Hz) para ZF y 19% (18 bits/s/Hz) para el caso de MRT. Particularmente, la técnica de precodificación ZF presenta una mejora de rendimiento insignificante en comparación con las demás, a tal punto que MRT la supera en un rango de potencia más amplio (de -20 a 5 dB) respecto a las pruebas anteriores.

**Figura 14:** Tasa de transmisión alcanzable con diferente SNR cuando  $M=80$  y  $K=75$ .



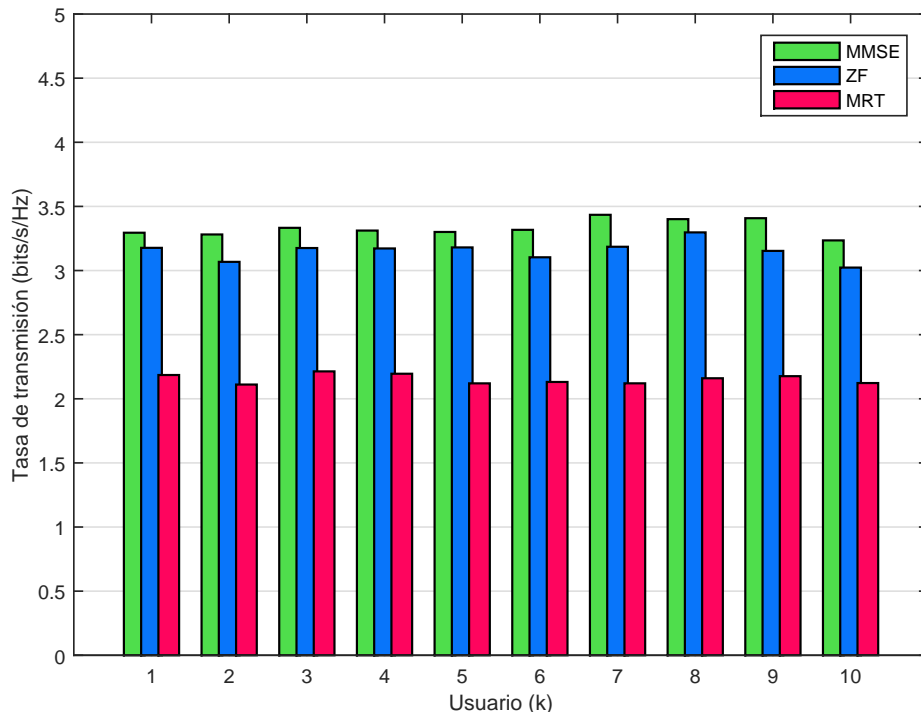
La figura 14 corresponde a los resultados obtenidos cuando  $M = 80$  y  $K = 75$ . La tasa de transmisión de datos a una potencia de 10 dB incrementa alrededor del 2% (4 bits/s/Hz) para el precodificador MMSE y 14% (16 bits/s/Hz) para MRT. Por el contrario, la técnica de ZF presenta un decremento de 56% (75 bits/s/Hz) siendo muy superada por MMSE a través de todo el rango de potencia, y por MRT en un rango todavía más amplio: de -20 a 13 dB.

La tasa de transmisión de datos alcanzable por el sistema incrementa significativamente a medida que se incorporan más usuarios debido al aumento en ganancia de multiplexación. Sin embargo, cuando el número de usuarios activos se acerca al número de antenas en la estación base, las condiciones de propagación no son ideales debido a que la ganancia de diversidad no es lo suficientemente grande para garantizar múltiples trayectorias de comunicación a cada usuario. Por este motivo, la tasa de transmisión deja de crecer en la misma proporción para las técnicas de precodificación MMSE y MRT e incluso se ve reducida en el caso de ZF.

### 5.3. Escenario III

Una vez estudiada la tasa de transmisión de datos alcanzable del sistema, en este escenario se quiere conocer la forma en que se distribuye esta capacidad a nivel de los usuarios. Con este objetivo considérese el caso estudiado en la figura 8, en donde  $M = 20$  y  $K = 10$ . La tasa de transmisión por usuario cuando la estación base transmite a una potencia de 6 dB se muestra en la figura 15.

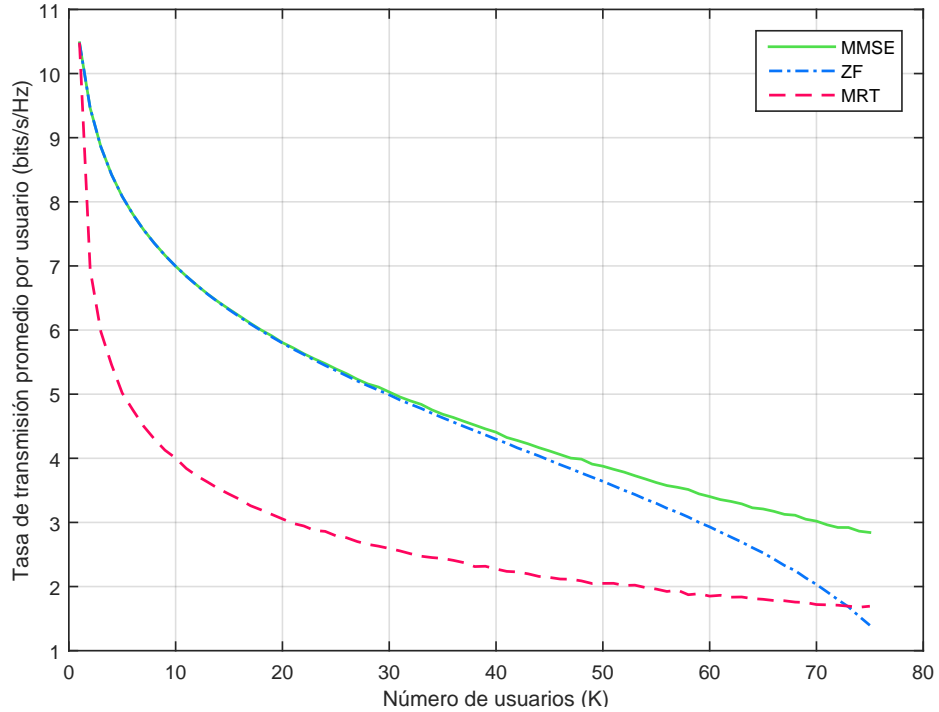
**Figura 15:** Tasa de transmisión por usuario cuando  $M=20$ ,  $K=10$  y  $\text{SNR}=6$  dB.



Conforme a los resultados obtenidos, cada uno de los 10 usuarios tiene estadísticamente la misma capacidad en términos de tasa de transmisión de datos, según el rendimiento de la técnica de precodificación lineal que utilice la estación base. En consecuencia, puede afirmarse que idealmente la capacidad del sistema se distribuye equitativamente entre los terminales activos, aunque en la práctica esto depende del buen conocimiento que se tenga de las condiciones de propagación de cada usuario.



**Figura 16:** Tasa de transmisión promedio por usuario vs. número de usuarios cuando  $M=80$  y  $\text{SNR}=10$  dB.

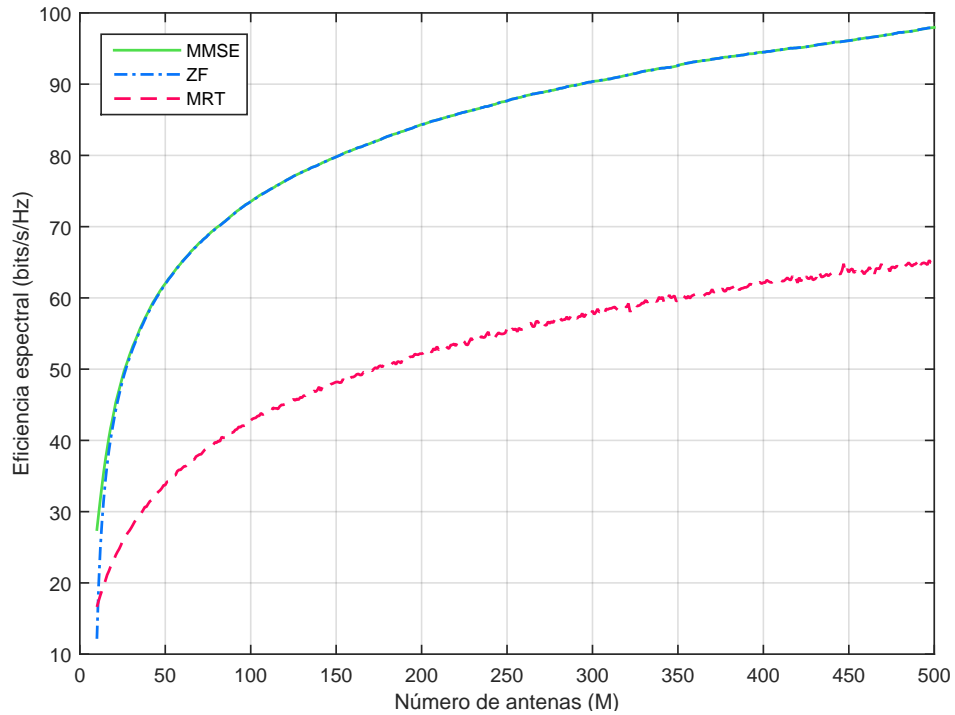


Para ampliar esta exposición, en la figura 16 se examina la tasa de transmisión promedio por usuario cuando el número de antenas en la estación base es  $M = 80$ , se transmite con una potencia de  $\text{SNR}=10$  dB y el número de usuarios activos ( $K$ ) aumenta desde 1 hasta 75. Los resultados indican que la tasa de transmisión promedio por usuario disminuye a medida que incrementa el número de usuarios que comparten la capacidad del sistema. En particular, el rendimiento de la técnica de precodificación ZF se ve notoriamente afectado cuando  $K \rightarrow M$ , por lo que su utilización se justifica siempre que se pueda garantizar que  $M \gg K$ .

## 5.4. Escenario IV

En este escenario se estudia la eficiencia espectral del sistema a medida que aumenta el número de antenas y de usuarios. Para el primer caso, considérese el resultado de la figura 17, en donde el número de usuarios es  $K = 10$ , la potencia de transmisión es de  $\text{SNR}=10$  dB y el número de antenas ( $M$ ) en la estación base aumenta desde 10 hasta 500. Aquí se observa que la eficiencia espectral del sistema incrementa considerablemente al utilizar un número de antenas cada vez más grande en la estación base, para cada una de las técnicas de precodificación lineal estudiadas debido a la ganancia de diversidad.

**Figura 17:** Eficiencia espectral vs. número de antenas cuando  $K=10$  y  $\text{SNR}=10$  dB.

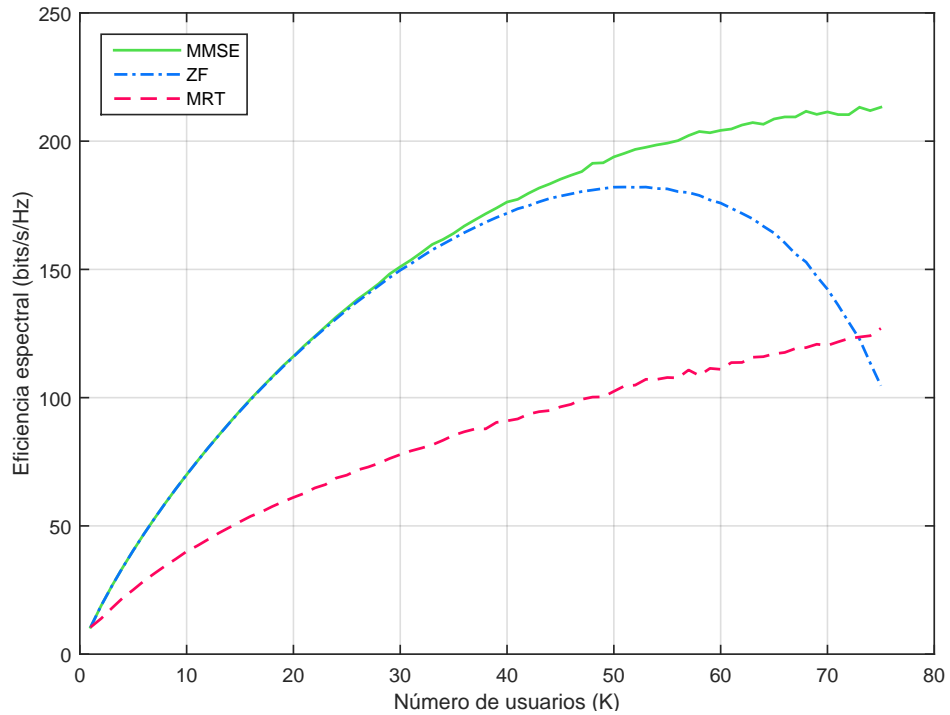


A nivel de tecnologías, la eficiencia espectral evoluciona a partir de GSM con 0.05 bits/s/Hz (9.6 kbits/s sobre una banda de 200 kHz) a 0.4 bits/s/Hz (2 Mbits/s sobre 5 MHz) con UMTS, a 3 bits/s/Hz (14 Mbits/s en 5 MHz) con HSPA y a 5 bits/s/Hz (100 Mbits/s sobre 20 MHz) con LTE, que si considera MIMO 4x4 puede llegar a 16 bits/s/Hz<sup>30</sup>. En conformidad con lo anterior, los sistemas MIMO Masivo superan con creces las prestaciones de que hasta ahora disponen los sistemas de comunicación celular. Por ejemplo, si para el caso de estudio se eligen 300 antenas en la estación base y la precodificación MMSE, el sistema ofrece una eficiencia espectral cercana a los 90 bits/s/Hz, que en una banda de 20 MHz representan una velocidad de 1800 Mbits/s de la que cada uno de los 10 usuarios utiliza 180 Mbits/s, cumpliendo así con el requerimiento de 5G para escenarios urbanos.

En la figura 18 se considera el caso en que una estación base con  $M = 80$  antenas transmite con una potencia de  $\text{SNR}=10$  dB a un número de usuarios ( $K$ ) que aumenta desde 1 a 75. La eficiencia espectral del sistema incrementa a medida que  $K$  se hace grande para los precodificadores MMSE y MRT, debido a la ganancia de multiplexación. En contraste, la eficiencia espectral con ZF aumenta hasta que el número de usuarios es  $K = 53$ , y a partir de este punto comienza a disminuir producto de que  $K \rightarrow M$ .

<sup>30</sup>Comes y Vodafone, *LTE: nuevas tendencias en comunicaciones móviles*.

**Figura 18:** Eficiencia espectral vs. número de usuarios cuando  $M=80$  y  $SNR=10$  dB.

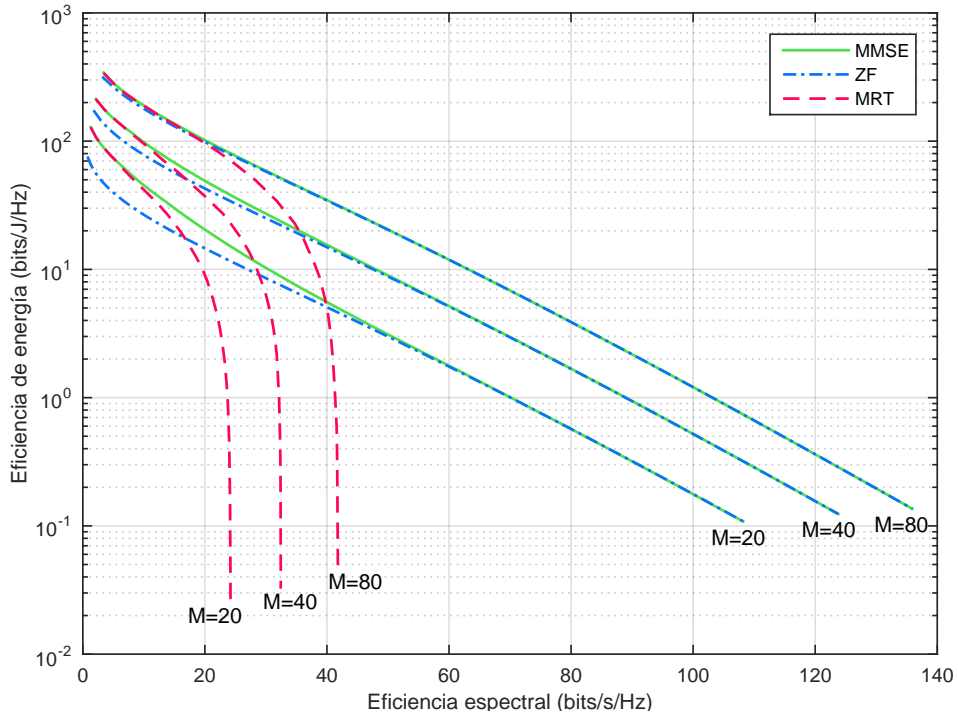


Para el caso en que existan  $K = 30$  usuarios activos y se utilice la técnica de precodificación lineal MMSE o ZF, la eficiencia espectral es de aproximadamente 150 bits/s/Hz, que representan 3000 Mbits/s en un ancho de banda de 20 MHz: una velocidad de 100 Mbits/s para cada usuario. Esto significa que MIMO Masivo tiene las condiciones para proporcionar gran capacidad y alta tasa de transmisión de datos, dos de los principales requerimientos para la próxima generación de telefonía móvil 5G.

## 5.5. Escenario V

Finalmente, el compromiso entre la eficiencia espectral y la eficiencia de energía es estudiado en este escenario. Considérese el caso en que la estación base transmite a  $K = 10$  usuarios con una potencia de  $SNR=10$  dB, utilizando un número de antenas ( $M$ ) que se duplica tomando valores de 20, 40 y 80. El resultado de la simulación corresponde a la figura 19, en donde a una eficiencia espectral de 20 bits/s/Hz el precodificador MMSE tiene una eficiencia de energía de 20 bits/J/Hz cuando  $M = 20$ . Al duplicar el número de antenas a 40 y 80, la eficiencia de energía aumenta hasta 48 y 100 bits/J/Hz, respectivamente. En el caso del precodificador ZF, la eficiencia de energía aumenta de 14 bits/J/Hz hasta 43 y 99 bits/J/Hz, a medida que se duplica el número de antenas. Respecto a MRT, inicia con una eficiencia de energía de 10 bits/J/Hz y alcanza los 37 y 95 bits/J/Hz al duplicarse el número de antenas.

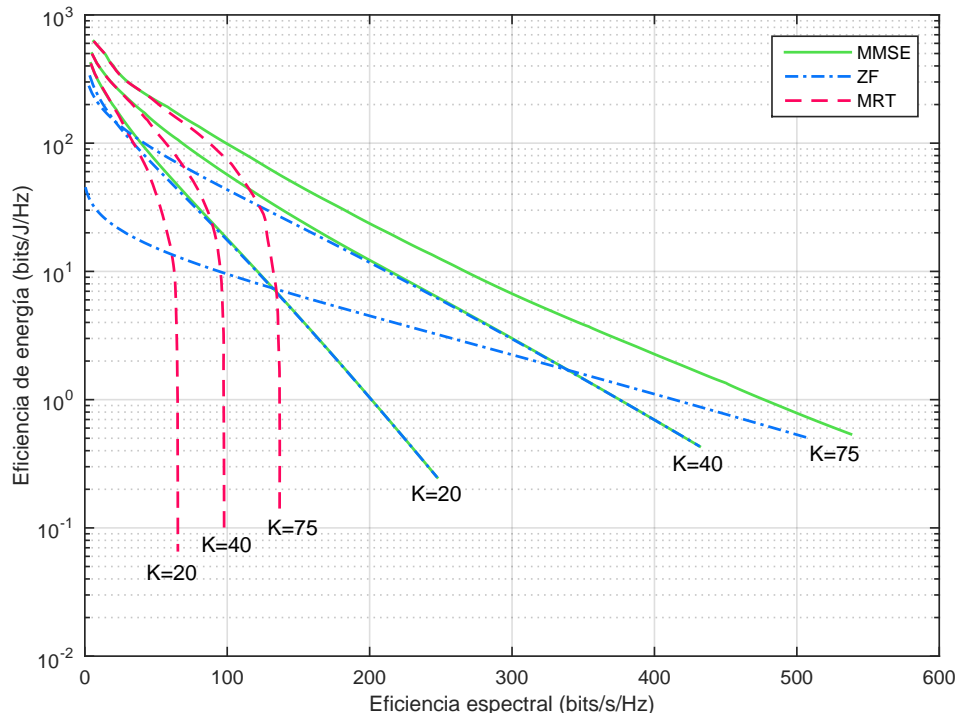
**Figura 19:** Eficiencia de energía vs. eficiencia espectral cuando  $K=10$  y  $SNR=10$  dB.



En correspondencia con lo anterior, al duplicarse el número de antenas en la estación base la eficiencia de energía como mínimo se duplica para un mismo valor de eficiencia espectral, esto debido a que más antenas pueden direccionar mejor la señal hacia cada usuario evitando un consumo excesivo de energía. En general, el precodificador MRT presenta un buen rendimiento a alta eficiencia de energía y baja eficiencia espectral, mientras que ZF ofrece mejores resultados a baja eficiencia de energía y alta eficiencia espectral. La técnica de MMSE es la que ofrece el mejor desempeño en todo el rango de eficiencia espectral.

Ahora considérese el caso en que la estación base tiene un número de antenas fijo  $M = 80$ , transmite con una potencia de  $SNR=10$  dB y el número de usuarios activos ( $K$ ) incrementa en 20, 40 y 75. El resultado de la figura 20 muestra que para los precodificadores lineales MMSE y MRT, la eficiencia de energía aumenta a medida que crece el número de usuarios activos en el sistema. Respecto a ZF, la eficiencia de energía también incrementa pero empieza a caer cuando el número de usuarios se acerca al número de antenas. Por lo general, MMSE ofrece la mejor eficiencia de energía en cada caso mientras que MRT sobresale a alta eficiencia de energía y baja eficiencia espectral. En consecuencia, MIMO Masivo también contribuye a alcanzar las metas en términos de rendimiento energético y bajo consumo de la red de telefonía móvil de quinta generación.

**Figura 20:** Eficiencia de energía vs. eficiencia espectral cuando  $M=80$  y  $\text{SNR}=10$  dB.



## 6. CONCLUSIONES

Los sistemas MIMO Masivo tienen la potencialidad de incrementar significativamente la eficiencia espectral de la red móvil gracias a su eficiente estrategia de multiplexación espacial. Al mismo tiempo, mejoran la eficiencia de energía notablemente al enfocar la energía de transmisión según la localización de los usuarios. Estas propiedades son posibles cuando la estación base utiliza un procesamiento simple de las señales como las técnicas de precodificación lineal estudiadas, las cuales aprovechan las condiciones favorables de propagación en un intervalo de coherencia establecido, permitiendo cumplir con los requerimientos de 5G a nivel de capacidad, tasa de transmisión de datos y rendimiento energético.

La técnica de precodificación lineal basada en MMSE alcanza el mejor desempeño en términos de tasa de transmisión de datos, eficiencia espectral y energética para la mayoría de escenarios considerados. Sin embargo, para satisfacer una alta demanda de datos siempre que exista un gran número de antenas en la estación base en comparación con el número de usuarios activos, es preferible utilizar el precodificador ZF, el cual requiere de menor cálculo computacional y presenta un óptimo rendimiento en estas condiciones. Para escenarios con menor tráfico de datos es viable el uso del precodificador MRT debido a que puede satisfacer esta demanda utilizando menor potencia de transmisión y complejidad computacional. Estas características permiten adoptar una técnica de precodificación en particular de acuerdo a la capacidad requerida en un lugar determinado y a la potencia de los equipos de transmisión disponibles.

A partir del compromiso entre la eficiencia espectral y de energía, es posible configurar un punto de operación de acuerdo al tráfico de datos en un momento determinado. Por ejemplo, con un número de antenas fijo en la estación base, durante periodos de baja demanda se puede optar por establecer un número de usuarios, una técnica de precodificación o una potencia de transmisión estratégica, de manera que el sistema MIMO Masivo presente alta eficiencia de energía y baja eficiencia espectral pero suficiente para cumplir con la demanda de datos actual. En general, para un número de usuarios fijo, al duplicarse el número de antenas en la estación base y reducir la potencia de transmisión a la mitad, es posible alcanzar la misma eficiencia espectral que en condiciones normales, es decir, la eficiencia de energía del sistema se duplica.

## 7. RECOMENDACIONES

MIMO Masivo todavía se encuentra en una etapa de concepción por lo que existen muchas posibilidades de investigación en este campo que requieren atención. Por ejemplo, la información del estado del canal (CSI) es un factor crítico para el rendimiento del sistema. Un buen conocimiento del estado del canal garantiza el correcto procesamiento de los datos en la estación base. El desafío es encontrar una manera de realizar esta estimación que sea rápida y compatible con escenarios de gran movilidad.

En este trabajo se estudiaron las características de MIMO Masivo en el escenario de una sola célula. Es preciso extender el análisis a situaciones donde más células están involucradas y por lo tanto deben tenerse en cuenta otras consideraciones. En concreto, la señalización y la adquisición del estado del canal se hace más difícil en ambientes donde los usuarios abscritos a diferentes células interfieren entre sí. No sería práctico asignar una secuencia de entrenamiento ortogonal a cada usuario debido al limitado intervalo de coherencia del canal, por lo que habría que establecerse una estrategia de reutilización de estas secuencias de una célula a otra. En estas condiciones la estimación del estado del canal obtenido en una célula estaría potencialmente contaminada por las secuencias de entrenamiento transmitidas por usuarios de células vecinas.

## BIBLIOGRAFÍA

- BJORNSSON, E., E. G. LARSSON y M. DEBBAH. “Massive MIMO for Maximal Spectral Efficiency: How Many Users and Pilots Should Be Allocated?” En: *IEEE Transactions on Wireless Communications* 15.2 (2016), págs. 1293-1308.
- CHO, Y. y col. *MIMO-OFDM Wireless Communications with MATLAB*. Wiley, 2010.
- CHOCKALINGAM, A. y B. RAJAN. *Large MIMO Systems*. Cambridge University Press, 2014 (vid. pág. 15).
- COMES, R. y F. VODAFONE. *LTE: nuevas tendencias en comunicaciones móviles*. Fundación Vodafone España, 2010 (vid. págs. 20, 21, 28, 44).
- COX, C. *An Introduction to LTE: LTE, LTE-Advanced, SAE and 4G Mobile Communications*. Wiley, 2012.
- ERICSSON. *5G Radio Access*. 2015 (vid. pág. 33).
- ERICSSON. *Ericsson Mobility Report*. 2015 (vid. págs. 15-17).
- GAO, X. y col. “Massive MIMO Performance Evaluation Based on Measured Propagation Data”. En: *IEEE Transactions on Wireless Communications* 14.7 (2015), págs. 3899-3911.
- GAO, X. y col. “Linear Pre-Coding Performance in Measured Very-Large MIMO Channels”. En: *Vehicular Technology Conference (VTC Fall), 2011 IEEE*. 2011, págs. 1-5.
- GOLDSMITH, A. *Wireless Communications*. Cambridge University Press, 2005.
- ITU. *Recommendation ITU-T Y.2060: Overview of the Internet of things*. 2012 (vid. pág. 15).
- LARSSON, E. y col. “Massive MIMO for next generation wireless systems”. En: *Communications Magazine, IEEE* 52.2 (2014), págs. 186-195 (vid. pág. 22).
- LI, Y. y col. “Implementation of full-dimensional MIMO (FD-MIMO) in LTE”. En: *Signals, Systems and Computers, 2013 Asilomar Conference on*. 2013, págs. 998-1003.



MARZETTA, T. L. “Noncooperative Cellular Wireless with Unlimited Numbers of Base Station Antennas”. En: *IEEE Transactions on Wireless Communications* 9.11 (2010), págs. 3590-3600 (vid. pág. 18).

MOLISCH, A. *Wireless Communications*. Wiley - IEEE. Wiley, 2012.

NGO, H. Q. “Massive MIMO: Fundamentals and System Designs”. Tesis doct. Linköping University, The Institute of Technology, 2015, pág. 45 (vid. págs. 22-24, 26-29).

NGO, H. Q. *Performance Bounds for Very Large Multiuser MIMO Systems*. 2012 (vid. págs. 22, 24, 25).

NGO, H. Q., E. LARSSON y T. MARZETTA. “Energy and Spectral Efficiency of Very Large Multiuser MIMO Systems”. En: *Communications, IEEE Transactions on* 61.4 (2013), págs. 1436-1449 (vid. pág. 35).

NGO, H. Q., E. LARSSON y T. MARZETTA. “Massive MU-MIMO downlink TDD systems with linear precoding and downlink pilots”. En: *Communication, Control, and Computing (Allerton), 2013 51st Annual Allerton Conference on*. 2013, págs. 293-298 (vid. pág. 26).

NOKIA. *5G Uses cases and requirements*. 2014 (vid. pág. 33).

PANZNER, B. y col. “Deployment and implementation strategies for massive MIMO in 5G”. En: *Globecom Workshops (GC Wkshps), 2014*. 2014, págs. 346-351.

RAPPAPORT, T. S. *Wireless Communications: Principles and Practice*. Prentice Hall communications engineering and emerging technologies series. Dorling Kindersley, 2009 (vid. pág. 16).

RUSEK, F. y col. “Scaling Up MIMO: Opportunities and Challenges with Very Large Arrays”. En: *IEEE Signal Processing Magazine* 30.1 (2013), págs. 40-60.

SHEN, J. C., J. ZHANG y K. B. LETAIEF. “Downlink User Capacity of Massive MIMO Under Pilot Contamination”. En: *IEEE Transactions on Wireless Communications* 14.6 (2015), págs. 3183-3193.

STANKOVIC, V. y M. HAARDT. “Generalized Design of Multi-User MIMO Precoding Matrices”. En: *Wireless Communications, IEEE Transactions on* 7.3 (2008), págs. 953-961.

TRANTER, W. *Principles of Communication Systems Simulation with Wireless Applications*. Prentice Hall communications engineering and emerging technologies series. Prentice Hall Professional Technical Reference, 2004 (vid. pág. 32).

VU, M. y A. PAULRAJ. “MIMO Wireless Linear Precoding”. En: *IEEE Signal Processing Magazine* 24.5 (2007), págs. 86-105.

# ANEXOS

## ANEXO A. Códigos en Matlab

Los códigos utilizados para simular los diferentes escenarios están contenidos en el disco correspondiente a esta investigación.