



**UNIVERSIDAD  
DE GRANADA**

**Universidad de Granada**  
*Departamento de Teoría de la Señal, Telemática y  
Comunicaciones.*

**PROGRAMA DE DOCTORADO EN  
TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN Y LA  
COMUNICACIÓN**

TESIS DOCTORAL:

**CONTRIBUCIÓN AL ANÁLISIS DE  
SISTEMAS MIMO Y MIMO MASIVO EN  
REDES MÓVILES DE NUEVA GENERACIÓN**

Presentada por:

**Juan Carlos González Macías**  
Ingeniero de Telecomunicación

Dirigida por:

**Juan Francisco Valenzuela Valdés**  
Doctor Ingeniero de Telecomunicación

Granada, octubre de 2019

Editor: Universidad de Granada. Tesis Doctorales  
Autor: Juan Carlos González Macías  
ISBN: 978-84-1306-502-1  
URI: <http://hdl.handle.net/10481/62363>



---

*A mi familia que me ha animado en los momentos necesarios.*

---





# AGRADECIMIENTOS

---

*A mi director de tesis, Juan Francisco Valenzuela Valdés, profesor de la Universidad de Granada en la E.T.S. de Ingenierías Informática y de Telecomunicación, que tuve la suerte de conocer en Mérida, (Badajoz), y que sin su ayuda y colaboración hubiera sido imposible entregar esta tesis.*

*A mi tutor de tesis, Pablo Padilla de la Torre, profesor de la Universidad de Granada en la E.T.S. de Ingenierías Informática y de Telecomunicación que ha ayudado desde el principio y colaborado en todo lo que ha podido.*

*A Francisco Luna, profesor de la Universidad de Málaga en la E.T.S. Ingeniería Informática que ha colaborado con esta tesis.*

*A mis compañeros del Centro Universitario de Mérida (CUM) de la Universidad de Extremadura, que me han animado en la finalización de esta tesis.*

---



# ÍNDICE

<b>ÍNDICE .....</b>	<b>I</b>
<b>RESUMEN .....</b>	<b>VI</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>VIII</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1 Evolución de las redes de las telecomunicaciones .....	1
1.1.1 Bandas de trabajo de las diferentes generaciones de redes móviles.....	3
1.2 Tecnologías de transmisión radio con múltiples antenas .....	5
1.2.1 Sistemas MIMO.....	6
1.2.2 Sistemas MIMO Distribuidos.....	8
1.3 Aspectos de estudio en la tecnología 5G.....	9
1.3.1 Propagación de señal.....	9
1.3.2 Forma de onda .....	10
1.3.3 Acceso al usuario en sistemas móviles.....	11
1.3.1 Las ondas milimétricas y su influencia en la seguridad y salud. ....	11
1.3.2 Antenas reconfigurables .....	11
1.4 Soluciones candidatas para tecnologías 5G.....	12
1.4.1 Redes MIMO Masivas. ....	13
1.4.2 Gestión de interferencias. ....	14
1.4.3 Compartición de espectro.....	15
1.4.4 Comunicación entre dispositivos. ....	16
1.4.5 Redes Ultra Densas (UDN). ....	17
1.4.6 Tecnologías de acceso multiradio. ....	17
1.4.7 Ondas milimétricas en redes móviles 5G. ....	18
1.4.8 Evolución de las redes troncales en 5G .....	19
1.4.9 Internet de las cosas. (IoT) .....	20
1.4.9.1 Internet de las cosas en los edificios. (IoT).....	22
1.5 Estado actual y estandarización de 5G. ....	24
1.5.1 Estado actual en España. Plan Nacional 5G.....	24
1.5.2 5G en la Unión Europea .....	26
1.5.3 Estandarización de 5G .....	26
1.5.4 Proyectos y referencias que trabajan en 5G.....	28
1.6 Análisis del mercado de las telecomunicaciones. ....	30

1.6.1	Evolución de las conexiones móviles.....	31
1.7	Organización de la tesis.....	35
<b>2.</b>	<b>EL CANAL DE COMUNICACIONES.....</b>	<b>37</b>
2.1	Introducción .....	37
2.2	Modelos del canal de propagación.....	39
2.2.1	Modelos del canal de propagación analíticos.....	39
2.2.2	Modelos del canal de propagación basados en medidas.....	40
2.3	Simuladores del canal de propagación.....	42
2.4	Capacidad del canal de comunicaciones.....	45
2.4.1	Escenarios MIMO medidos.....	45
2.4.1	Escenarios MIMO Distribuidos medidos.....	47
2.5	Análisis inicial de sistemas MIMO y MIMO Distribuidos.....	48
2.5.1	Nomenclatura.....	49
2.5.2	Comparación sistemas SIMO, MIMO y DMIMO.....	50
2.5.3	Comparación sistemas Teórico y DMIMO.....	53
2.5.4	Análisis de sistemas MIMO en función del grado de correlación.....	54
2.5.5	Análisis de sistemas DMIMO en función del grado de correlación.....	56
2.5.6	Análisis de sistemas teórico y mejor DMIMO.....	57
2.6	Conclusiones.....	58
<b>3.</b>	<b>SISTEMAS MIMO DISTRIBUIDOS MASIVOS.....</b>	<b>60</b>
3.1	Introducción.....	60
3.2	Sistema D-MIMO 5x3.....	61
3.2.1	Sistema formado por 5 BS. Caso a.....	61
3.2.2	Sistema formado por 5 BS. Caso b.....	63
3.2.3	Sistema formado por 3 BS.....	64
3.2.4	Sistema formado por 2 BS.....	66
3.2.5	Sistema formado por 1 BS.....	68
3.3	Sistema D-MIMO 7x3.....	71
3.3.1	Sistema formado por 7 BS.....	71
3.3.2	Sistema formado por 4 BS.....	73
3.3.3	Sistema formado por 3 BS.....	75
3.3.4	Sistema formado por 1 BS.....	76
3.4	Sistema DM-MIMO 10x3.....	78
3.4.1	Sistema formado por 7 BS.....	79
3.4.2	Sistema formado por 5 BS.....	80
3.4.3	Sistema formado por 2 BS.....	82
3.4.4	Sistema formado por 1 BS.....	84
3.5	Sistema DM-MIMO 20x3.....	86
3.5.1	Sistema formado por 7 BS.....	87
3.5.2	Sistema formado por 5 BS.....	89
3.5.3	Sistema formado por 2 BS.....	92
3.6	Sistema DM-MIMO 40x3.....	95
3.6.1	Sistema formado por 7 BS.....	96
3.6.2	Sistema formado por 4 BS.....	98
3.7	Conclusiones.....	99

## 4. SISTEMAS MIMO DISTRIBUIDOS MASIVOS DE POTENCIA VARIABLE ..... 102

4.1	Introducción .....	102
4.2	Sistema DMIMO de potencia variable 5x3 en 5 BS.....	104
4.2.1	Análisis sistema A1.....	105
4.2.2	Análisis sistema A2.....	106
4.2.3	Análisis sistema A3.....	108
4.2.4	Análisis sistema A4.....	112
4.2.5	Análisis sistema A5.....	114
4.2.6	Análisis sistema A6.....	117
4.2.7	Análisis sistema A7.....	119
4.3	Sistema formado por 5 antenas transmisoras y 3 receptoras en 3 BS .....	121
4.3.1	Análisis sistema A.....	121
4.3.2	Análisis sistema B.....	123
4.3.3	Análisis sistema C.....	125
4.4	Sistema formado por 10 antenas transmisoras y 3 receptoras en 5 BS ...	126
4.4.1	Análisis sistema B1.....	126
4.4.2	Análisis sistema B2.....	128
4.4.3	Análisis sistema B3.....	130
4.4.4	Análisis sistema B4.....	131
4.5	Conclusiones.....	133

## 5. SISTEMAS MIMO DISTRIBUIDOS MASIVOS EN ALTA FRECUENCIA. .... 134

5.1	Introducción.....	134
5.1.1	Implementación de los Sistemas DM-MIMO.....	134
5.1.2	Nomenclatura.....	137
5.2	Análisis realizados.....	140
5.3	Sistemas MIMO-Masivos con 30X4 antenas.....	141
5.3.1	Análisis a 28 GHz, 3 escenarios.....	142
5.3.2	Análisis a 40 GHz, 3 escenarios.....	143
5.3.3	Análisis a 78 GHz, 3 escenarios.....	145
5.4	Análisis sistema DM-MIMO. 30x4.....	146
5.4.1	Sistema DM-MIMO 30x4. Correlado.....	147
5.4.1.1	Análisis a 28 GHz.....	148
5.4.1.2	Análisis a 40 GHz.....	149
5.4.1.3	Análisis a 78 GHz.....	149
5.4.2	Sistema DM-MIMO 30x4 no correlado.....	150
5.4.2.1	Análisis a 28 GHz.....	151
5.4.2.2	Análisis a 40 GHz.....	152
5.4.2.3	Análisis a 78 GHz.....	152
5.4.3	Comparativa DMIMO correlados y no correlados.....	153
5.4.3.1	Análisis en el escenario RMa.....	154
5.4.3.2	Análisis en el escenario UMA.....	155
5.4.3.3	Análisis en el escenario UMi.....	155
5.5	Análisis sistema DM-MIMO. Estudio del parámetro de visibilidad.....	156
5.5.1	Análisis para el escenario RMa.....	157

5.5.2	Análisis para el escenario UMa.....	158
5.5.3	Análisis para el escenario UMi.....	158
5.5.4	Comparación diferentes escenarios y visibilidad.....	159
5.6	Comparativa de sistemas MIMO y DMIMO .....	160
5.6.1	Análisis sistemas MIMO y DMIMO ANÁLISIS A 28 GHz.....	162
5.6.2	Análisis sistemas MIMO y DMIMO ANÁLISIS A 40 GHz.....	163
5.6.3	Análisis sistemas MIMO y DMIMO ANÁLISIS A 78 GHz.....	165
5.7	Sistema DM-MIMO 60X4.....	166
5.7.1	Análisis a 28 GHz .....	167
5.7.2	Análisis a 40 GHz .....	168
5.7.3	Análisis a 78 GHz .....	169
5.8	Sistema M-MIMO 30x10.....	170
5.8.1	Análisis escenario RMa.....	172
5.8.2	Análisis escenario UMa.....	172
5.8.3	Análisis escenario UMi.....	173
5.9	Sistema DM-MIMO con 5 BS. 50x10.....	174
5.9.1	Sistema DM-MIMO con 5 BS. 50x10. Correlado.....	175
5.9.1.1	Sistema DM-MIMO. Análisis a 10GHz.....	176
5.9.1.2	Sistema DM-MIMO. Análisis a 28 GHz .....	177
5.9.1.3	Sistema DM-MIMO. Análisis a 40 GHz .....	177
5.9.2	Sistema DM-MIMO con 5 BS. 50x10. NO correlado.....	178
5.9.2.1	Sistema DM-MIMO. Análisis a 10 GHz .....	179
5.9.2.2	Sistema DM-MIMO. Análisis a 28 GHz .....	180
5.9.2.3	Sistema DM-MIMO. Análisis a 40 GHz .....	180
5.9.3	Comparativa de sistemas correlados y no correlados.....	181
5.10	Análisis sistema DMIMO con 2 BS. Sistemas 50x10 .....	182
5.10.1	Análisis escenario RMa.....	183
5.10.2	Análisis escenario UMa.....	184
5.10.3	Análisis el escenario UMi.....	185
5.10.4	Comparación diferentes escenarios y visibilidad .....	186
5.11	Conclusiones.....	187
<b>6.</b>	<b>REALIZACIÓN DE UN MODELO DE APAGADO DE CELDAS EN REDES ULTRADENSAS 5G .....</b>	<b>190</b>
6.1	Introducción .....	190
6.2	Consumo energético en las redes 5G.....	191
6.3	Modelo del sistema.....	193
6.3.1	Potencia recibida .....	193
6.3.2	Relación señal Interferencia más ruido (SINR) .....	194
6.3.3	Capacidad .....	194
6.3.4	Potencia consumida por las celdas.....	195
6.3.5	Dinamismo. Movilidad de usuario.....	195
6.4	Optimización del consumo energético.....	196
6.4.1	Eficiencia energética .....	198
6.5	Optimización del apagado de celdas (problema CSO).....	200
6.6	Conclusiones .....	202
<b>7.</b>	<b>CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS.....</b>	<b>203</b>

7.1	Conclusiones.....	203
7.1.1	Avances en sistemas MIMO Masivos Distribuidos.....	203
7.1.2	Avances en los sistemas MIMO Masivos Distribuidos en alta frecuencia 204	
7.1.3	Avances en la eficiencia energética.....	205
7.2	Líneas Futuras.....	206
7.2.1	Líneas futuras relacionadas con los sistemas de medidas del campo de propagación.....	206
7.2.2	Líneas futuras relacionadas con la emulación del campo de propagación. 206	
7.2.3	Líneas futuras relacionadas con el consumo energético.....	207
7.3	Resultados obtenidos por el autor.....	208
7.3.1	Publicaciones en revistas internacionales con JCR.....	208
7.3.2	Publicaciones en congresos.....	208
7.3.3	Otras publicaciones.....	209
7.3.3.1	Publicaciones en revistas internacionales con JCR en docencia.....	209
7.3.3.2	Publicaciones en congresos en docencia.....	209
<b>8.</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>211</b>
<b>9.</b>	<b>APÉNDICES.....</b>	<b>216</b>
9.1	Ilustraciones.....	216
9.2	Relación de tablas.....	219
9.3	Ecuaciones.....	221
9.4	Acrónimos.....	222



## RESUMEN

Las expectativas de crecimiento en la demanda de datos han hecho concentrar los esfuerzos de los investigadores en comunicaciones en el desarrollo de la 5ª Generación de comunicaciones móviles (5G). El 3GPP (3rd Generation Partnership Project) organismo internacional que agrupa 7 organizaciones de estandarización de telecomunicaciones, está definiendo las características de esta nueva tecnología. Aunque en su última especificación técnica (Release 15) se han definido gran parte de las especificaciones de esta nueva generación de comunicaciones móviles, todavía quedan muchas cuestiones abiertas que esperan sean definidas en la "Release 16" en junio de 2020. Gran parte de las cuestiones abiertas están relacionadas sobre cómo implementar los canales de comunicaciones por encima de los 50 GHz. Los objetivos de esta nueva generación de comunicaciones móviles son múltiples entre los que destacan multiplicar la velocidad de conexión hasta alcanzar los 10 Gbps y reducir el consumo en un 90%.

Por una parte, entre los avances tecnológicos que serán necesarios para aumentar la velocidad de transmisión se encuentran el uso de "Massive MIMO", es decir, el uso de la tecnología MIMO de forma masiva. De la misma forma serán necesarias comunicaciones cooperativas, es decir, el uso de comunicaciones distribuidas donde el terminal móvil se comunicará con distintas estaciones base que están en distintas localizaciones. Todo lo anterior será necesario desarrollarlo en las frecuencias de las ondas milimétricas donde las tecnologías de fabricación y las medidas del canal de propagación están todavía en un estado incipiente. Existen estudios teóricos que nos indican que cuando el número de antenas en el transmisor es mucho mayor que el número de antenas en el receptor, el canal de propagación global se comporta en términos estadísticos de una manera más estable y por ello es posible obtener mayores ganancias de capacidad de transmisión. Por tanto, es importante caracterizar estas propiedades únicas del canal de propagación de este tipo de sistemas para constatar los beneficios reales de la tecnología MIMO Masiva. En consecuencia, la caracterización de canal en estos nuevos escenarios de comunicaciones distribuidos y masivos serán un objetivo de esta tesis y plantea un enorme desafío científico.

Por otro lado, para reducir el consumo será necesario utilizar algoritmos de optimización avanzados que realicen un apagado de las estaciones base en función del canal de propagación, es decir, será necesario un conocimiento profundo tanto de estos sistemas de comunicaciones y su canal de propagación como de algoritmos

avanzados de optimización. Para ello en esta tesis se ha trabajado con algoritmos metaheurísticos para contribuir a la minimización del consumo energético de estos sistemas manteniendo sus prestaciones. Por ello en esta tesis se han estudiado diferentes sistemas MIMO, MIMO Masivo, MIMO distribuido y MIMO Masivo Distribuidos, así como los algoritmos optimización para la reducción del consumo energético.

La tesis esta estructurada de la siguiente forma, en primer lugar, se introduce el contexto de investigación. **En el capítulo 2** se introducen los diferentes sistemas MIMO Y DMIMO. **En el capítulo 3** se analizan los sistemas DM-MIMO emulando más de 50 escenarios diferentes. **En el capítulo 4** se estudia cómo se comporta la capacidad del sistema global en función de la potencia que llegue desde cada estación base. Se realiza la emulación de más de 100 escenarios distintos. **En el capítulo 5** se implementa un sistema que permite analizar sistemas DM-MIMO en frecuencias de milimétricas analizando más de 1000 entornos diferentes. **En el capítulo 6** se implementa una red de comunicaciones 5G, utilizando todos los sistemas anteriores con el objetivo de aplicar algoritmos genéticos para mejorar la eficiencia energética. Estos algoritmos de optimización hacen uso de todos los cálculos del canal de comunicaciones desarrollados en los capítulos anteriores. Finalmente se presentan las conclusiones y línea futuras.

## ABSTRACT

Expectations of growth in the demand for data have focused the efforts of communications researchers on the development of the 5th Generation of mobile communications (5G). The 3GPP (3rd Generation Partnership Project), an international organization that brings together 7 telecommunications standardization organizations, is defining the characteristics of this new technology. Although its latest technical specification (Release 15) has defined much of the specifications of this new generation of mobile communications, there are still many open questions that hope to be defined in "Release 16" in June 2020. Most of the open questions are related to how to implement communications channels above 50 GHz. The objectives of this new generation of mobile communications are multiple among which are to multiply the connection speed to reach 10 Gbps and reduce consumption by 90%.

On the one hand, among the technological advances that will be necessary to increase the transmission speed are the use of "Massive MIMO", that is to say, the use of MIMO technology in a massive way. In the same way will be necessary cooperative communications, ie the use of distributed communications where the mobile terminal will communicate with different base stations that are in different locations. All of the above will need to be developed at millimetre-wave frequencies where manufacturing technologies and propagation channel measurements are still in an incipient state. There are theoretical studies that indicate that when the number of antennas in the transmitter is much greater than the number of antennas in the receiver, the global propagation channel behaves in statistical terms in a more stable way and therefore it is possible to obtain greater gains in transmission capacity. Therefore, it is important to characterize these unique properties of the propagation channel of this type of systems to see the real benefits of the Massive MIMO technology. Consequently, channel characterization in these new distributed and mass communication scenarios will be an objective of this thesis and poses an enormous scientific challenge.

On the other hand, in order to reduce consumption it will be necessary to use advanced optimisation algorithms that switch off base stations according to the propagation channel, i.e. it will be necessary to have a deep knowledge of these communications systems and their propagation channel as well as advanced optimisation algorithms. To this end, in this thesis it has been have worked with metaheuristic algorithms in order to contribute to the minimization of energy

consumption of these systems while maintaining their performance. Therefore in this thesis have been studied different systems MIMO, Massive MIMO, distributed MIMO and Distributed Massive MIMO, as well as optimization algorithms for the reduction of energy consumption.

The thesis is structured in the following way, first of all, the research context is introduced. In chapter 2 the different MIMO and DMIMO systems are introduced. In chapter 3 the DM-MIMO systems are analyzed by emulating more than 50 different scenarios. Chapter 4 examines how the capacity of the overall system behaves according to the power coming from each base station. More than 100 different scenarios are emulated. In chapter 5 a system is implemented that allows to analyze DM-MIMO systems in millimetre frequencies analysing more than 1000 different environments. In chapter 6 a 5G communications network is implemented, using all the previous systems with the aim of applying genetic algorithms to improve energy efficiency. These optimization algorithms make use of all the communications channel calculations developed in the previous chapters. Finally, conclusions and future lines are presented.

# 1. INTRODUCCIÓN

Este primer capítulo sirve de preámbulo de la tesis, para introducir los diferentes aspectos donde se enmarca esta tesis, por ello se desarrollarán los contextos histórico, investigador, tecnológico y económico de las comunicaciones móviles. En primer lugar, se realizará un breve repaso a la evolución histórica de las redes de telecomunicaciones. Se continuará con los fundamentos de los sistemas de comunicaciones móviles actuales de múltiples antenas sobre los que se han de construir los avances. En el punto 3 de este primer capítulo se especificarán los distintos aspectos que necesitan estudiarse y mejorarse de las redes de comunicaciones para poder desarrollar la próxima generación de comunicaciones móviles. Algunos de estos estudios están bastante avanzados y se han propuesto diversas tecnologías para afrontar los requisitos propuestos, en el punto 4 de esta introducción se ven dichas propuestas tecnológicas. En el punto 5 se analiza el estado actual y los planes de desarrollo de las redes 5G a nivel nacional e internacional. También en este punto se analiza el estado de la estandarización y los grandes proyectos que están trabajando en el desarrollo de las redes 5G. El marco económico se afronta en el punto 6 donde se analiza el mercado de las telecomunicaciones actualmente. Para finalizar este capítulo de introducción se detalla en el último punto la organización de la tesis.

## 1.1 Evolución de las redes de las telecomunicaciones

Desde las primeras comunicaciones vía radio hasta el actual teléfono móvil el avance tecnológico ha sido tan grande que es difícil entender que se haya producido en tan corto espacio de tiempo. Las comunicaciones en general, y el teléfono móvil en concreto ha transformado la sociedad actual hasta extremos inimaginables tan solo hace 20 años atrás.

Las comunicaciones móviles comenzaron a finales del siglo XX, y hoy en día están integradas en nuestra sociedad como algo natural. Todo comenzó con las primeras tecnologías de comunicaciones móviles, conocida como 1G, que actualmente nos parece muy básica, en comparación de las capacidades de comunicación que tenemos actualmente. La evolución de las tecnologías móviles ha permitido incrementar entre otras cosas: la velocidad de transmisión, la movilidad y la cobertura de los usuarios.

La figura 1.1 presenta la evolución de las redes inalámbricas y las tecnologías implicadas:

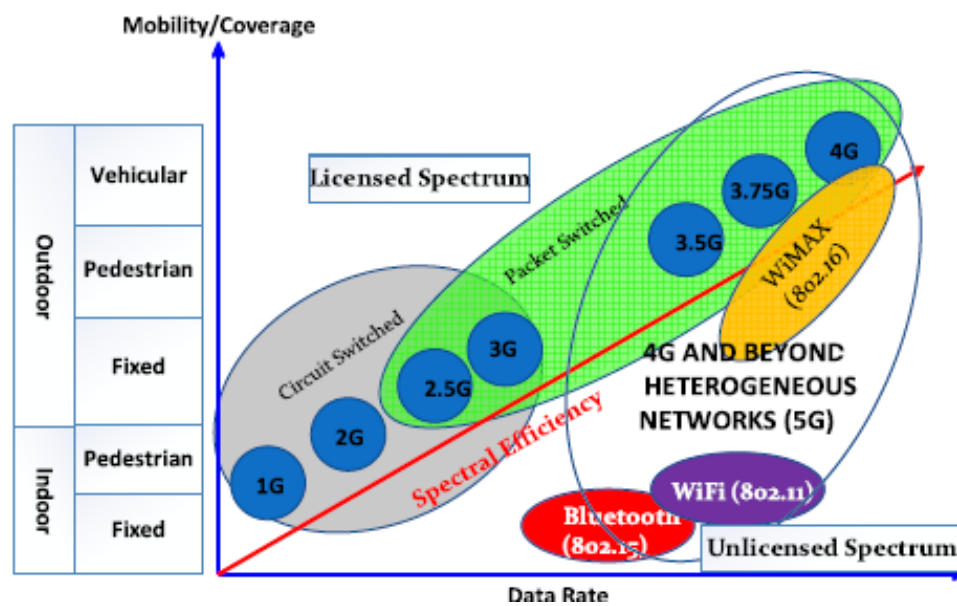


Figura 1-1. Evolución de las redes inalámbricas. [1]

En la figura 1.1 se representa esquemáticamente las tecnologías usadas de conmutación de circuitos o paquetes y como se incrementa linealmente la eficiencia espectral de cada una de ellas. A continuación, pasaremos hacer una breve descripción de las diferentes generaciones de comunicaciones móviles:

- Así tenemos la tecnología 1G, Red de comunicación móvil de Primera Generación, de finales de siglo XX, a finales de 1980, la tecnología era analógica, solo permitía servicios de voz, y usaba multiplexación FDMA. Las comunicaciones eran de baja calidad y la seguridad era muy baja. En España el operador era Telefónica, que operaba bajo el nombre de Moviline. La velocidad de transmisión llegaba a 2,4 Kbps.
- La tecnología 2G, Red de comunicación móvil de Segunda Generación, que apareció la última década del siglo XX, más conocida como GSM (Sistema Global para Comunicaciones Móviles), fue en gran impulso para las comunicaciones móviles, ya que disparó su utilización por los usuarios. Las baterías de los móviles duran más que los anteriores, ya que se usan señales de baja potencia. Esta tecnología, que ya era digital, con tecnología de TDMA y CDMA, permitía velocidades de datos de hasta 64 Kbps, y lo que le dio un gran impulso para los usuarios es que ofrecía una gran cantidad de servicios, como SMS, retención de llamadas, autenticación, bloqueo de llamadas, etc... Como mejora de transmisión de datos apareció la tecnología conocida como "Generación 2.5", que permitía velocidades de datos más altas, usando la misma tecnología 2G, pero aplicando conmutación de paquetes, conocido como GPRS (Servicio General de Paquetes de Radio). Permitía servicios como juegos, acceso a correo electrónico, videoconferencia, etc..
- La red de comunicación móvil de tercera Generación, 3G, apareció en el año 2000. Ofreció mayor velocidad de datos y más y mejores servicios de

comunicación como acceso a internet de alta velocidad, acceso fijo inalámbrico a internet, servicios de localización, multimedia, etc.. dando velocidades de hasta 2 Mbps. Utiliza la tecnología “Wideband Code Division Multiple Access”(WCDMA). Esta tecnología 3G supuso un avance importante con respecto a la anterior. La principal desventaja es que necesitaba mayores potencias que las tecnologías anteriores. Avances en velocidad de transmisión con tecnologías “High Speed Uplink/Downlink Packet Access (HSUPA/HSDPA)” que permitían velocidades de hasta 30 Mbps, dieron lugar a tecnología intermedia llamada 3.5. como avance de esta tecnología aparece la tecnología “Long-Term Evolution technology (LTE)”, que permite el acceso a una amplia gama de servicios de alta velocidad, permitiendo el acceso a la red con menor coste y mejores coberturas.

- La red de comunicación móvil de cuarta generación, 4G, en la que nos hallamos actualmente, está basada en IP, y proporciona alta velocidad, capacidad, seguridad y servicios de bajo coste, dando velocidades de hasta 1Gbps. Permite servicios como Multimedia Messaging Service (MMS), Digital Video Broadcasting (DVB), y TV de alta definición.
- La red de comunicación móvil de quinta generación, 5G, ofrecerá velocidades de hasta 10 GBps, permitirá conexión masiva de dispositivos a internet y gran cantidad de servicios de telecomunicación, como personas y dispositivos conectados. La red 5G permitirá que las comunicaciones sean la pieza básica de las relaciones humanas, de la educación y las investigaciones, e influirá en todos los aspectos del mundo civilizado. La demanda actual de mayores velocidades de transmisión, menor latencia, conectividad masiva de aparatos, menor costo y mayor calidad de las conexiones móviles, producirá un paso natural de las redes 4G a las 5G, ya que la tecnología actual no es capaz de soportar los servicios que está demandando la sociedad actualmente.
- La evolución de las distintas generaciones de comunicaciones móviles ha desarrollado en paralelo una evolución en las bandas de frecuencias utilizadas para las diferentes tecnologías que veremos a continuación.

#### 1.1.1 Bandas de trabajo de las diferentes generaciones de redes móviles.

Las diferentes tecnologías de redes móviles, desde las primeras hasta la actual, conocida como 4G, está limitada al uso de las bandas de frecuencias por debajo de los 6 GHz. Estas bandas de frecuencias están sobre utilizadas, y las posibles bandas de frecuencias que se asignan a las transmisiones de redes móviles son pequeñas, en comparación de las bandas necesarias para poder soportar las demandas de aparatos conectados y la velocidad de transmisión que se demandan actualmente, que se espera que la demanda sufra un crecimiento exponencial.

La banda de trabajo en la frecuencia de microondas es una banda de trabajo bien apropiada para las transmisiones de redes móviles, pero está totalmente usada y no

es posible asignar más frecuencias a las redes móviles. En cambio, la banda de trabajo de ondas milimétricas, no está tan saturada, existen bandas de frecuencias libres, que no están asignadas, y es posible asignar bandas de frecuencias anchas para usar en las comunicaciones de redes móviles. En especial, la banda de 30 GHz a 100 GHz, está por explotar, y explorar. Explotar porque hay muchas frecuencias libres para usar, y por explotar porque se están realizando análisis de cómo se comportarán las transmisiones en frecuencias elevadas, tales como 90 GHz, ya que, aunque se pueda predecir el comportamiento, no se ha utilizado aun realmente estas bandas de frecuencias y por ello no se sabe realmente como se comportarán en transmisión de señales.

En la tabla 1.1 tenemos la comparación entre las frecuencias de microondas y ondas milimétricas para redes móviles. Se observa como el ancho de banda disponible aumenta conforme subimos en frecuencias, en las ondas milimétricas. La figura 1.2 presenta las frecuencias disponibles de igual manera que en la tabla 1.1, incluyendo las bandas no usables por la absorción de las moléculas de aguas. Del análisis de la tabla 1.1, se obtiene que las bandas de principales de absorción del vapor de agua son de 57 a 64 GHz y de 164 a 200 GHz. Quitando esas dos bandas, proporcionalmente pequeñas, el resto del espectro queda potencialmente disponible para las comunicaciones móviles en tecnología 5G.

Band	Generation	Frequency (GHz)	Wavelength (m)	Frequency Range (GHz)	Bandwidth (GHz)	Available Bandwidth (GHz) <sup>3</sup>
μWave	2G	0.8	0.3750	0.791 - 0.862	1.117 <sup>4</sup>	2.5
		0.9	0.3333	0.880 - 0.959		
	3G	1.8	0.1667	1.710 - 1.880		
	4G	2.1	0.1429	1.920 - 2.169		
		2.6	0.1154	2.500 - 2.690		
	5G	0.6	0.500	0.470 - 0.694		
		0.7	0.4286	0.694 - 0.790		
		1.5	0.2000	1.427 - 1.518		
		3.5	0.0857	3.300 - 3.800		
		4.7	0.0638	4.500 - 4.990		
mmWave	5G	5.6	0.0536	5.500 - 5.700	1.0	23
		23	0.0130	22.55 - 23.55		
		28	0.0107	27.50 - 31.23		
		38	0.0079	38.6 - 40.0		
		40	0.0075	40.5 - 42.5		
		46	0.0065	45.5 - 46.9		
		47	0.0064	47.2 - 48.2		
		49	0.0061	48.2 - 50.2		
		73	0.0041	71 - 76		
		83	0.0036	81 - 86		
93	0.0032	92 - 95				

Tabla 1-1. Esquema de las relaciones entre las diferentes frecuencias. [2]



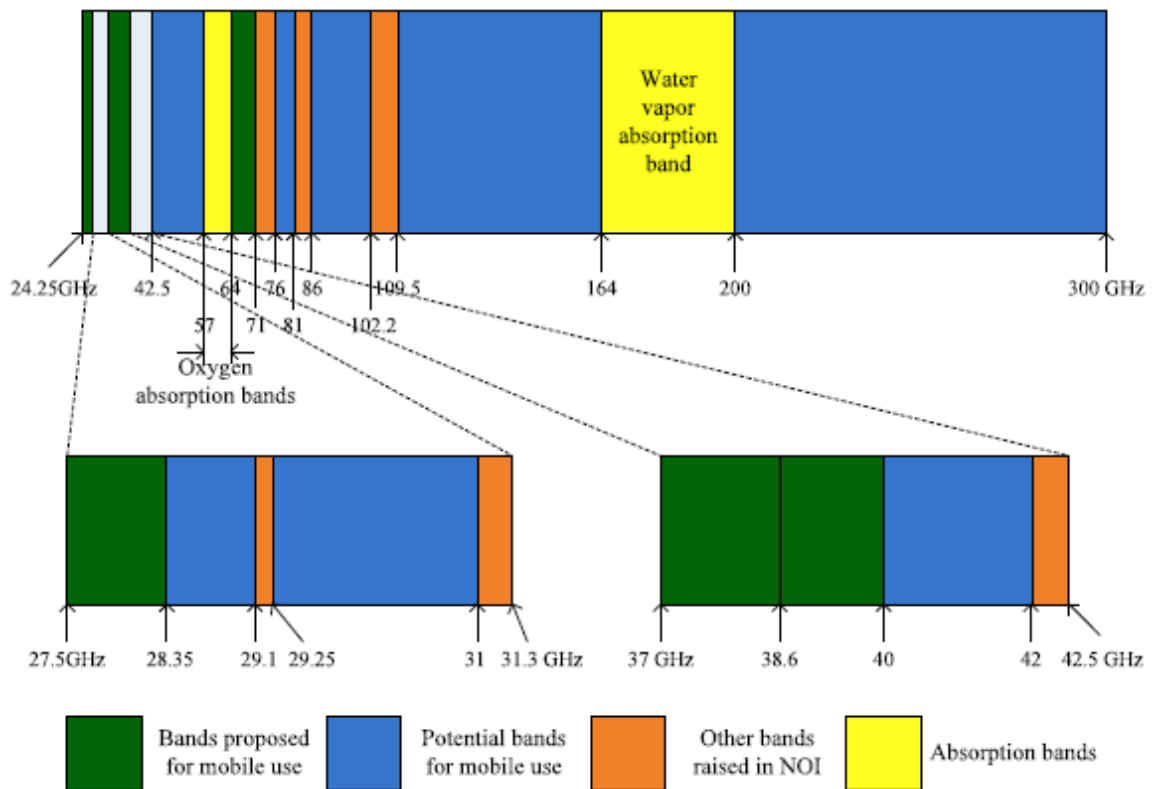
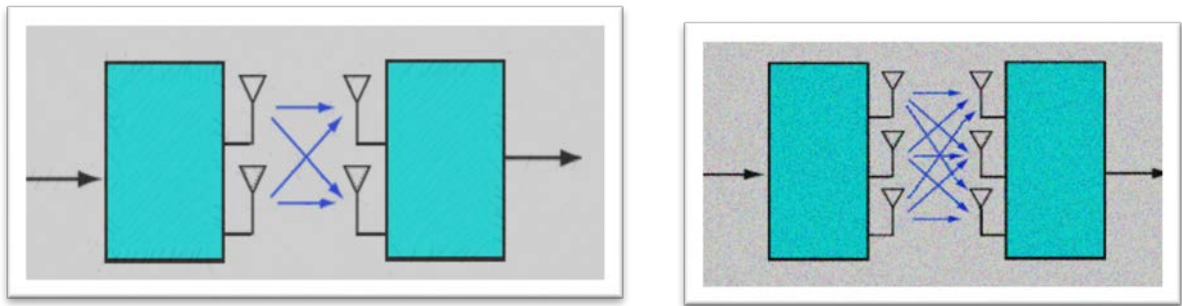


Figura 1-2. Espectro disponible en la banda de ondas milimétricas. [3]

## 1.2 Tecnologías de transmisión radio con múltiples antenas

Una de las principales novedades tecnológicas de los sistemas de 4<sup>a</sup> Generación fue el uso de múltiples antenas, esto permitió incrementar la velocidad de transmisión y es la base para el desarrollo de nuevas tecnologías en las próximas generaciones de comunicaciones móviles, por ello, se van a presentar en este apartado introductorio. La característica de comunicación de las técnicas MIMO que usa la propagación multicamino, permite aumentar la velocidad de transferencia de datos, y por ello son numerosos los fabricantes y operadores interesados en esta tecnología. A pesar que en los sistemas anteriores de comunicación la propagación multicamino era un problema, actualmente se usa para aumentar la velocidad de transmisión y reducir las tasas de error. Esto lo permite el hecho de usar varias antenas en transmisión y recepción con lo que puede utilizar varios canales de transmisión de datos o utilizar la multiplexación espacial.

En la figura 1.3 se muestra un ejemplo de sistemas MIMO. En un caso un sistema de 2x2 antenas y en el segundo caso un sistema de 3x3 antenas.



**Figura 1-3. Sistemas MIMO 2x2 y 2x3**

Una mejora de los sistemas MIMO son los Sistemas Distribuidos MIMO, también conocido como Multipunto Coordinado (CoMP) o MIMO cooperativo. En estos sistemas de MIMO distribuido se utilizan varias BS en transmisión y en recepción, al igual que en los sistemas MIMO, pero las antenas situadas en varias BS diferentes. Básicamente la diferencia entre los dos sistemas, es que en el sistema D-MIMO, los nodos en los que se sitúan las antenas está situadas lejos unas de otros, y en los sistemas MIMO las antenas están situadas cerca unas de otras, es decir en el mismo nodo.

Los sistemas D-MIMO combinan las mejoras de los sistemas MIMO, con las mejoras de las antenas distribuidas (DAS) [4], [5]. Esta tecnología es utilizada en la gran mayoría de las redes inalámbricas, tales como WIFI, CDMA, UMTS y LTE proporcionando gran cobertura y capacidad de transmisión.

La técnica de transmisión en sistemas MIMO distribuidos se usó para conseguir principalmente supresión de interferencias en el equipo de usuario, y necesita una alta velocidad de transmisión en la red de comunicación entre BS, para conocer en todas la BS la información del estado del equipo del usuario, y poder coordinar la comunicación. A continuación, se presentan más detalladamente los sistemas MIMO y MIMO Distribuidos.

### 1.2.1 Sistemas MIMO

Las investigaciones en sistemas MIMO se han multiplicado desde principios de siglo, con innumerables artículos analizando el número óptimo de antenas en transmisión y recepción que optimice las características de transmisión hasta el estado actual donde la tecnología está madura. Esta tecnología que usa varias antenas en transmisión y varias antenas en recepción es conocida como MIMO (Multiple-Input Multiple-Output). El uso de múltiples antenas permite usar técnicas de multiplexación espacial que incrementan la capacidad del canal, siendo en principio, la solución a las demandas de banda ancha. Los sistemas de transmisión MIMO mejoran la velocidad de transmisión y la relación de Bits erróneos, (BER).

Un esquema de las características de transmisión de un sistema MIMO se observa a continuación, en la figura 1.4, donde de manera esquemática se presentan las tres

técnicas más habituales para obtener beneficios con las técnicas MIMO. Estas técnicas también se presentan a continuación:

- Aumento de la velocidad de transmisión mediante la **técnica del multiplexado espacial**. Se conoce como “Multiplexing gain”, se basa en trocear la señal a transmitir en diferentes partes que serán transmitidas independientemente por cada antena, y recopiladas en el transmisor. De forma que, si tenemos M antenas, y dividimos la señal a transmitir en M trozos, la velocidad de transmisión se multiplica por M, sin aumentar el ancho de banda ni la potencia de transmisión.
- Tasas de error más pequeñas a través de la **técnica de ganancia de diversidad espacial**: Se conoce como “Diversity gain”, se basa en enviar la misma información redundante por diferentes antenas al mismo tiempo. En el receptor se necesita una combinación de señales redundantes que reduzcan los bits erróneos.
- Uso de la técnica de antenas inteligentes o **conformación de haz del diagrama de radiación**. Se conoce como “Antenna Gain”, se basa en el uso de antenas adaptativas mediante el uso de software, permiten conformar el haz de las antenas en ciertas direcciones. En realidad, se puede considerar como un filtro espacial, que solo recibe o emite señales en ciertas direcciones del espacio, y en las otras no, entre otras ventajas ya comentadas anteriormente en este documento.

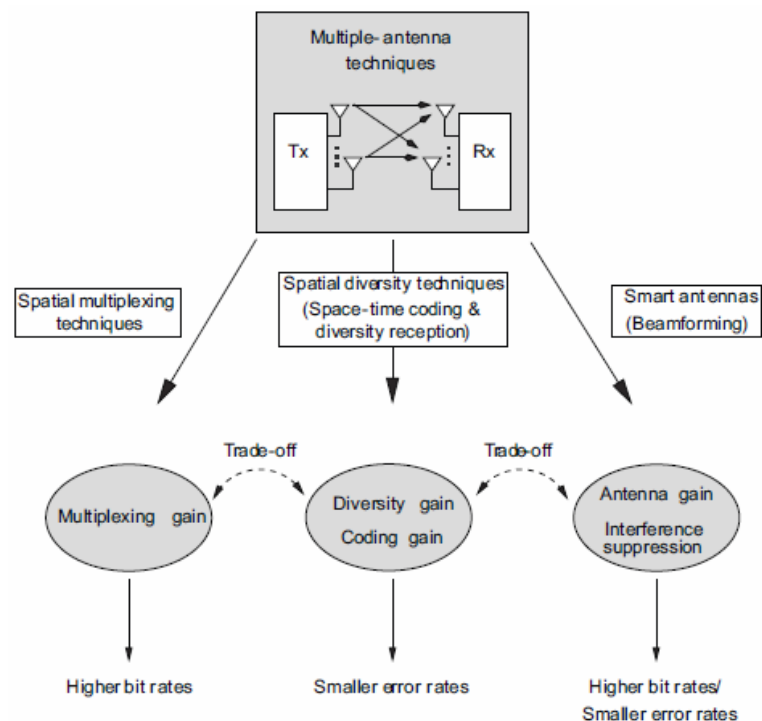


Figura 1-4. Transmisiones MIMO. [6]

Cada una de estas técnicas de transmisión de los sistemas MIMO puede usarse de manera independiente o de manera conjunta en los sistemas de comunicaciones.

Así la técnica de multiplexado espacial se usa sobre todo en transmisión multiusuarios, por ejemplo, una BS, que se comunica con los usuarios de una red de comunicación móvil. La técnica de diversidad espacial, se usa para reducir el BER añadiendo redundancia. La técnica de las antenas adaptativas se usa para aumentar la SINR.

Lógicamente los sistemas MIMO no son todo ventajas, también tienen sus defectos, como son unos mayores costos de procesadores tanto en transmisión como en recepción, y mayores consumos energéticos.

### 1.2.2 Sistemas MIMO Distribuidos

Los sistemas que tienen varias antenas en transmisión y/o recepción y además estas antenas están físicamente separadas son conocidos como como sistemas MIMO Distribuidos (DMIMO) o sistemas MIMO Cooperativos. La ventaja de estos sistemas DMIMO es que mejoran la capacidad y la cobertura de las conexiones de redes inalámbricas, al estar separadas las antenas y disminuir la correlación de ellas. Por tanto, se podría utilizar una antena de cada dispositivo o estación base, para realizar un sistema DMIMO.

Las desventajas de los sistemas DMIMO es el incremento de la complejidad de los sistemas, el incremento de procesado y la necesidad de análisis de señales al usar sistemas con las antenas distribuidas, situadas en distintas localizaciones.

La técnica de sistemas DMIMO reduce la interferencia entre celdas y mejora la cobertura de las celdas en sistemas de redes móviles. Se basa en compartir los datos y la información del estado del canal entre celdas vecinas, de forma que las BS puedan coordinar sus transmisiones en el enlace descendente y procesar conjuntamente las señales recibidas en el enlace ascendente. Ello implica una mayor comunicación del móvil con cada una de las BS, y una mayor comunicación, y coordinación entre las diferentes BS.

Un esquema de un sistema DMIMO se representa en la figura 1.5.

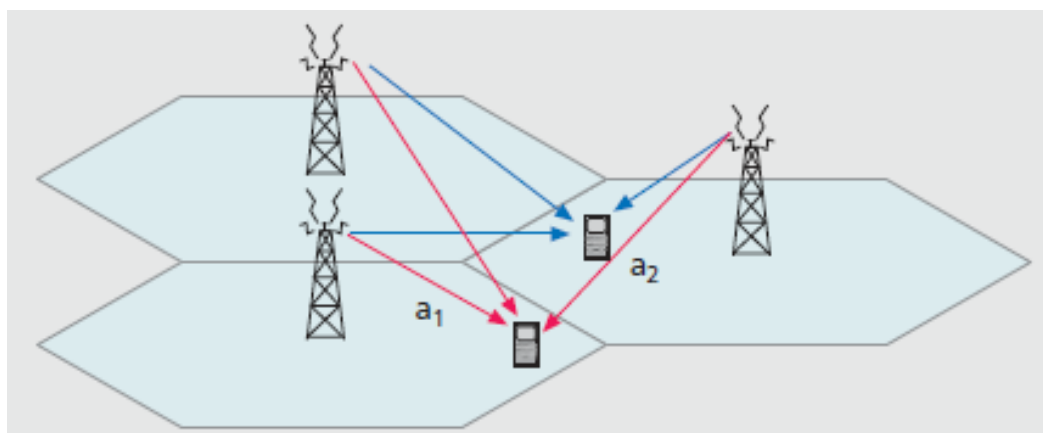


Figura 1-5. Esquema de *cooperative MIMO schemes in cellular systems*. [7]

En la figura 1.5 se representa la comunicación del móvil con cada una de las BS con las que puede tener comunicación al mismo tiempo.

Existen dos estructuras de comunicaciones móviles de sistemas DMIMO, una de ellas es la conocida como FIXED RELAY, que consiste en una infraestructura de antenas de radio conectadas sin cables, de forma que almacenan los datos de conexión en el enlace ascendente y descendente entre las BS y las estaciones móviles, Mobile Station (MS), los usuarios. De esta forma las MS, se conectan a la vez a varias de estas antenas, consiguiendo las ventajas de transmisión de los sistemas DMIMO, con un costo reducido con respecto al uso de muchas Estaciones Base.

La otra infraestructura de antenas DMIMO es la conocida como MOBILE RELAYS, en la cual las antenas que forman parte del móvil no pertenecen a la infraestructura de la red. Es decir, pueden ser las antenas de otro equipamiento de usuario las que actúan como sistema DMIMO, o la antena de un móvil como un tren o autobús. De esta forma se pueden usar las antenas de los otros móviles cercanos para aumentar la capacidad de transmisión de un móvil concreto. [8]. Esta técnica es menos estable que las anteriores, y lógicamente depende de las condiciones de cada caso en el momento de la transmisión, si existen o no dispositivos cercanos que puedan ceder sus antenas. Un esquema gráfico se observa en la figura 1.6.

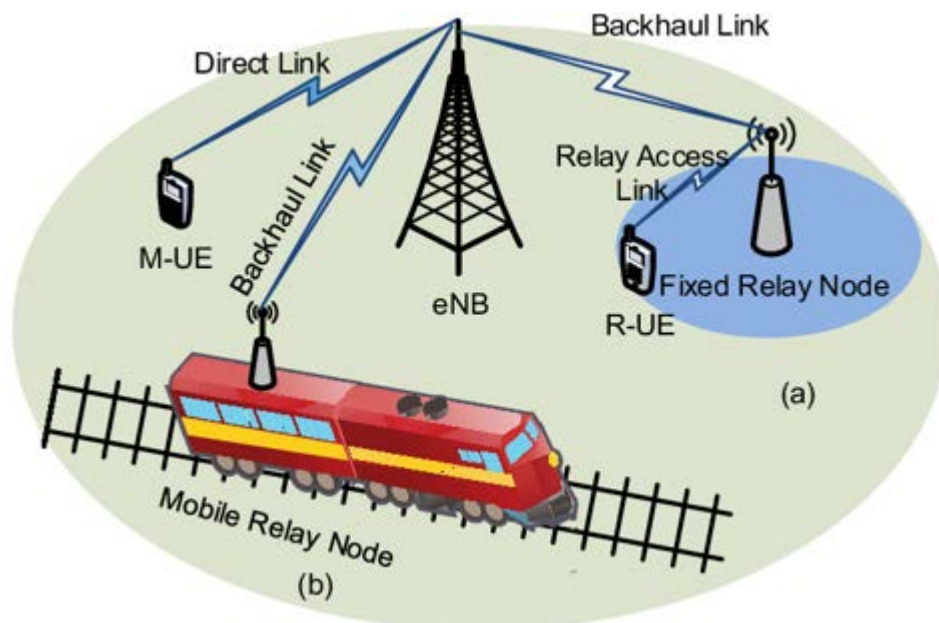


Figura 1-6. Gráfica de fixed relay y mobile relay.

### 1.3 Aspectos de estudio en la tecnología 5G.

#### 1.3.1 Propagación de señal.

Los canales de propagación en ondas milimétricas en altas frecuencias con sistemas MIMO masivos, tienen unas pérdidas muy importantes de propagación con el incremento de la frecuencia, alta pérdidas de difracción y de reflexión. Esto hace que se realicen grandes esfuerzos en estudiar las características de los canales de propagación, e incluso se está tratando de estandarizar las características de propagación de estos canales. No obstante, aún no se sabe suficientemente al respecto. Hay estudios de cómo se comportan los canales de propagación en condiciones estáticas y en condiciones dinámicas, tratando de clasificar y estudiar las características de propagación. Las dos técnicas empleadas para el estudio de las características de los canales de propagación son las “medidas de campo” y el “análisis matemático”, o modelado de canal.

Las medidas de campo son básicas en el estudio del canal de propagación, tanto en el caso estático como en el dinámico. Existen diferentes grupos e investigación y empresas, tales como New York University (NYU) Wireless [9] [10] [11] [12] [13] [14] [15] [16], que realizó medidas en 28 y 73 GHz en New York City (USA), mmMAGIC group for mmWave que realizó medidas en las frecuencias de 10-100 GHz en Berlin (Germany) y Zhao en Beijing (China) [17] [18] [19]. Estos investigadores han realizado medidas reales de propagación en todos los entornos y características de propagación diferentes posibles. No obstante, no se puede medir en todos los posibles escenarios reales que existen en la vida real. Por ello se trata de realizar un modelado matemático que prediga el comportamiento de los canales de propagación, a partir de los valores obtenidos en las medidas en el campo real. El análisis matemático, o modelado de canal, se basa en los valores obtenidos en las medidas reales de campo para a partir de esos valores estimar los predecibles valores que se obtendrá en la propagación de señales a través del canal en las condiciones de propagación definidas.

Tan importante es un modelo como otro, ya que sin las medidas reales de campo no se podrían estimar los posibles valores que se obtendrían matemáticamente. El análisis matemático permite predecir esos valores, con una fiabilidad aceptable, a partir de los valores obtenidos de medidas reales.

### 1.3.2 Forma de onda

Las características de la forma de onda que se usará en la propagación de señales en ondas milimétricas, con tecnología MIMO masivo, es un factor a definir que aún está en estudio. Este parámetro es tan importante que decidirá si las características de transmisión de la nueva tecnología 5G, en la que se está investigando, producirá los resultados tan buenos como se espera, en cuanto a transmisión de señales en propagación de redes móviles. Las tecnologías redes móviles últimas, 4G, LTE, han estado usando Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal, (OFDM). Esta técnica de transmisión ha funcionado bien para las tecnologías y banda de frecuencias actuales, pero tiene el problema de trabajar con alta relación de potencia de pico - potencia media, y usa amplificadores caros y de alto consumo, que producen una baja relación bit error (BER). Esta técnica de transmisión de onda parece en principio poco aceptable para la nueva tecnología 5G.

Algunos investigadores están considerando otras técnicas, tales como multiportadora de bancos de filtros, Filter Bank Multi-Carrier (FBMC) [20] [21] [22], Multiportadora filtrada universal, Universal Filtered Multi-Carrier (UFMC) [23] [24] [21] [25], Múltiple por división de frecuencia generalizada, Generalized FDM (GFDM) [26] y múltiple por división de frecuencia bi-ortogonal, Bi-orthogonal FDM (BFDM) [27] [28] [29].

### 1.3.3 Acceso al usuario en sistemas móviles.

Otro aspecto importante en cuanto a mejorar las características de transmisión es la forma de acceso al equipamiento de usuario. En este sentido se tiende a separar lo que es la información de control y lo que es información de usuario o datos. De esta forma la señal de control se transmite a través de un enlace de microondas con celdas de tamaño grande, macroceldas, y la información de datos al equipamiento de usuario se transmite a través de enlace en ondas milimétricas con tecnología MIMO masivo, en celdas muy pequeñas, micro celdas, que tendrán las características de transmisión de alta capacidad, alta fiabilidad, alta eficiencia espectral.

### 1.3.1 Las ondas milimétricas y su influencia en la seguridad y salud.

Los estudios de seguridad acerca de la influencia de las ondas electromagnéticas en el cuerpo humano, se limitan a estudios por debajo de los 100 GHz de frecuencia. No existen estudios que certifiquen a favor o en contra de los posibles daños de las señales en la banda de las ondas milimétricas, que estarán incluso por encima de los 100 GHz de frecuencia.

En principio, las ondas electromagnéticas en la banda de las ondas milimétricas no son ionizantes, que son las productoras de cáncer, con lo que podemos predecir que no producirán cáncer, a la espera de estudios que lo confirmen.

Así mismo, las ondas electromagnéticas en alta frecuencia, en principio producen calor en los cuerpos que contienen agua, tales como el cuerpo humano, que se verán incrementado su calor si se someten a radiaciones de ondas electromagnética, especialmente en la zonas más sensibles o menos irrigadas como los ojos. Existen estudios que predicen que los daños de las exposiciones a las radiaciones de ondas milimétricas son despreciables, en campo lejano. No obstante, no existen estudios que acrediten lo mismo en las radiaciones en campo cercano, y las investigaciones de salud y seguridad están enfocando sus estudios en ello.

### 1.3.2 Antenas reconfigurables

Al ser las antenas de pequeño tamaño, estas formarán arrays que permitirán crear unos diagramas de radiación muy directivos, de forma que la señal será recibida en la dirección de máxima radiación, y nada en el resto. Esto obliga a excitar cada antena del array, con la amplitud y fase necesaria para crear el diagrama de

radiación en la dirección deseada. Existen investigaciones dedicadas a crear algoritmos que consiguen estos diagramas de radiación.

Las tecnologías móviles actuales necesitan realizar cambios que permitan la evolución de las redes móviles. Algunos de estos cambios que tendrá que afrontar la tecnología móvil 5G, es dividir el escenario de comunicación entre los usuarios que se conectan con tecnologías móviles dentro de los edificios, la gran mayoría, y los que se conectan estando fuera de los edificios, una minoría.

Esta tecnología usaría MIMO masivo, de forma que con un haz de radiación muy estrecho se direccionaría a los usuarios que se conectan fuera de los edificios, y a unas antenas situadas en los edificios. Los usuarios que están dentro de los edificios se conectan a un punto de acceso, que están conectados a un array de antenas direccionadas por la BS exterior. Esta configuración reduce las pérdidas de propagación debidas el paso de muros, y mejora la eficiencia energética, la eficiencia espectral y la velocidad de datos.

Especialmente aplicable para aplicaciones móviles de alta velocidad, por carreteras o vías (tren), permitiría conexiones a altas velocidades con baja latencia, considerando el vehículo un punto de acceso que se comunica con la BS, y el vehículo se comunica con el usuario. La comunicación del vehículo con la BS se hace con un sistema MIMO masivo de alta direccionalidad.

#### **1.4 Soluciones candidatas para tecnologías 5G.**

Como se ha comentado anteriormente, las actuales tecnologías de comunicación inalámbrica actuales no podrán soportar las demandas de comunicación de los usuarios. Las características deseadas de las futuras redes 5G son: comunicaciones masivas en alta velocidad, muy baja latencia, una alta fiabilidad en las comunicaciones, y por supuesto un reducido consumo energético. Para poder alcanzar estas prestaciones es necesario desarrollar nuevas tecnologías y realizar mejoras en las existentes. El conjunto de conexiones que debe tener la tecnología 5G se presentan en la figura 1.7, que contiene redes MIMO masivo, redes de radio cognitiva, que gestiona dinámicamente los recursos (canales de frecuencia) a partir de los requisitos de calidad, y redes móviles estáticas y fijas. En la figura 1.7 también aparecen las conexiones Device to Device (D2D), las micro celdas y el internet de las cosas (IoT). En este apartado veremos algunas de las propuestas existentes:



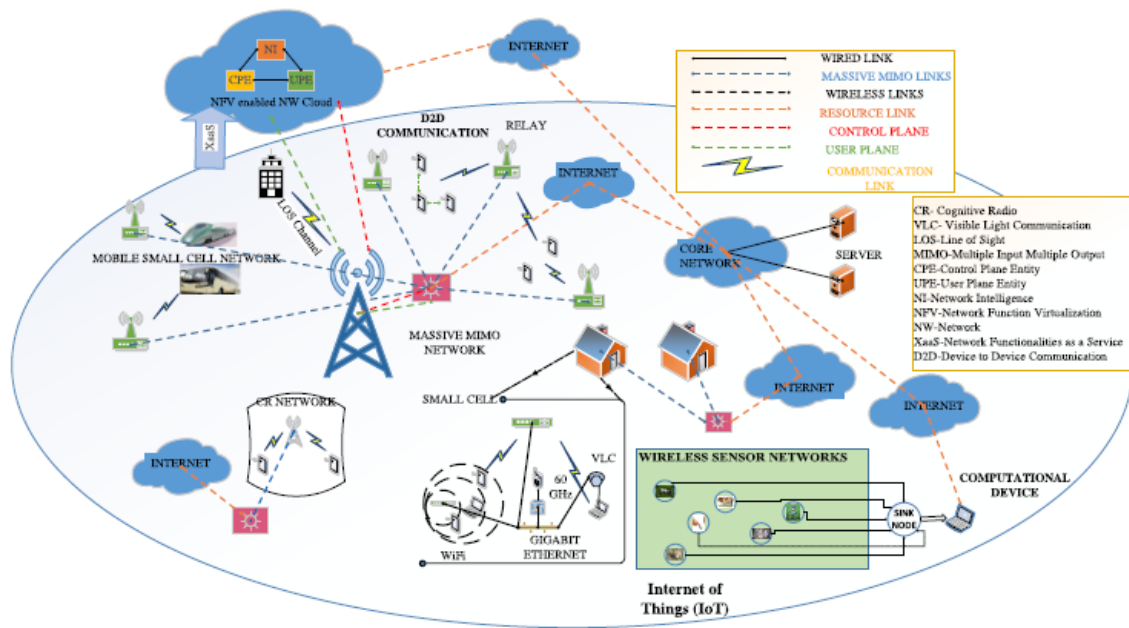


Figura 1-7. Estructura general de red 5G. [1]

Como aparecen en la figura 1.7, todas estas tecnologías tendrán que convivir y compartir escenario, así como ancho de banda, con la idea de dar el mejor servicio a los ciudadanos, en función de cada caso y necesidades.

#### 1.4.1 Redes MIMO Masivas.

La transmisión en los primeros sistemas móviles celulares se realizaba usando tecnología de sistemas SISO, una sola antena en el transmisor y una sola antena en el receptor. Posteriormente evolucionaron a sistemas MIMO, múltiples antenas en transmisor y en el receptor. Estos sistemas producen mucha más capacidad y fiabilidad que los sistemas anteriores. Tienen una ganancia de multiplexación, ganancia de diversidad y ganancia de array, como se ha comentado en el punto anterior. No es que todas estas características sean exactas y matemáticamente proporcionales al número de antenas, y todas al mismo tiempo, pero la mejora de un sistema respecto al otro es indiscutible.

La tendencia actual de la tecnología es el uso de MIMO masivo, es decir un sistema MIMO con un gran número de antenas, tanto en el transmisor, como en el receptor. Esta última tecnología usa algún ciento de antenas, y no está limitado como el sistema MIMO, en función de cuantas antenas dispone.

El uso de este tipo de sistemas, en comparación con el sistema MIMO convencional, mejora la eficiencia de energía radiada y la capacidad en más de 10 veces, debido a que puede concentrar el haz de radiación en las regiones del espacio a los que quiere se transmitir. Así mismo reduce el costo de los sistemas, ya que los cientos de antenas de un sistema MIMO masivo son alimentados por amplificadores de poca potencia, baratos, en lugar de los sistemas convencionales que usan pocos amplificadores de alta potencia, mucho más caros.

La Propagación multicamino permite reducir el ruido y el fading. La reducción del fading mejora los tiempos de latencia, ya que estos tiempos están incrementados debidos a la diversidad de caminos de la señal transmitida, y en los puntos de fading profundos se debe de volver a enviar la señal, aumentando los tiempos de latencia. Además, es un sistema robusto frente a interferencias malintencionadas, ya que el grado de libertad que ofrece el uso de muchas antenas permite posicionar el nulo del diagrama de radiación en la dirección de la interferencia.

Esta tecnología mejora la eficiencia espectral, la seguridad y la robustez de las futuras redes móviles. No obstante, antes de implantarse se deben resolver muchos problemas, tales como:

- El tratamiento de la gran cantidad de datos que deben manejar estos sistemas.
- La caracterización de los canales, número y geometría de la situación de las antenas.
- El uso combinado de un gran ancho de banda, en frecuencias muy altas, y el uso de una gran cantidad de antenas. Esto produce una gran cantidad de datos que deben ser procesados, lo cual genera un problema de computación añadido.
- Así mismo, el uso de celdas muy pequeñas, producirá en las redes móviles un frecuente paso de unas celdas a otras (handover), que producen un incremento de proceso computacional y envío de señales de señalización que permitan el handover.

Se espera que la arquitectura de los sistemas móviles que formará la tecnología 5G, esté formada por sistemas MIMO masivo, trabajen tanto en frecuencias de microondas como de ondas milimétricas, y tanto usando macro celdas como celdas pequeñas, con las técnicas de conformación de haz. Todo esto según cada caso concreto de red móvil en que se encuentre, la distancia del móvil la localización y el tipo de equipamiento de usuario.

#### 1.4.2 Gestión de interferencias.

Los sistemas de redes móviles 5G tienden hacia redes que serán cada vez más pequeñas y densas. Y la interferencia entre celdas vecinas, cocanales, será un problema a resolver. Serán necesarios receptores avanzados capaces de detectar la interferencia y eliminarlas.

La técnica de lóbulos muy estrechos, conocida como Beamforming. Es una técnica de procesamiento de señal, por la cual los diferentes elementos de un array de antena se adaptan en fase y amplitud, y con ello consiguen crear un diagrama de radiación con haces concentrados y directivos. Con la consecución de diagramas de radiación directivos, se consigue reducir las interferencias y mejorar la relación SNIR y reducir la interferencia con los canales adyacentes. Lógicamente, esta técnica se puede implementar tanto en el array de antenas de transmisión como en la de recepción.

La idea es que al controlar la amplitud y la fase de cada elemento del array de antenas, se consigue que el diagrama de radiación tenga un máximo en la dirección deseada y un nulo en la dirección deseada también. Cuando se pretende conseguir ganancias altas, es necesario utilizar un gran número de antenas. Solo en el caso la frecuencia de trabajo sea alta, tendremos longitudes de ondas pequeñas, que nos permitirán utilizar antenas de pequeños tamaños y por ello juntar muchas antenas en poco espacio. Ese es el caso de los dispositivos móviles, que son de pequeño tamaño, y es necesario usar antenas pequeñas si se pretende utilizar ésta técnica en dispositivos de en áreas reducidas. [30]

Debido al estrecho haz del diagrama de radiación de los arrays de antenas en propagación con ondas milimétricas, las Interferencias y la reutilización espacial, pueden ser un problema y deben ser tenidas en cuenta en las investigaciones. Así, en las conexiones entre BS, un enlace con alta directividad es casi como un enlace con cables, ya que no produce ni recibe interferencias de otras emisiones, debido a su estrecho haz de radiación. No obstante, en la transmisión de redes celulares, con los móviles, se pueden producir interferencias en cuanto una BS apunte con su haz de radiación a un equipamiento de usuario que esté siendo atendido por otra BS, y la idea de reutilizar las frecuencias debido al pequeño tamaño de las antenas no es tan viable, al ser las ganancias de los arrays tan grande. El esquema se aprecia en la figura número 1.8, en el que el AP1 está apuntando al ordenador que está conectado al AP2, y en consecuencia produce interferencias.

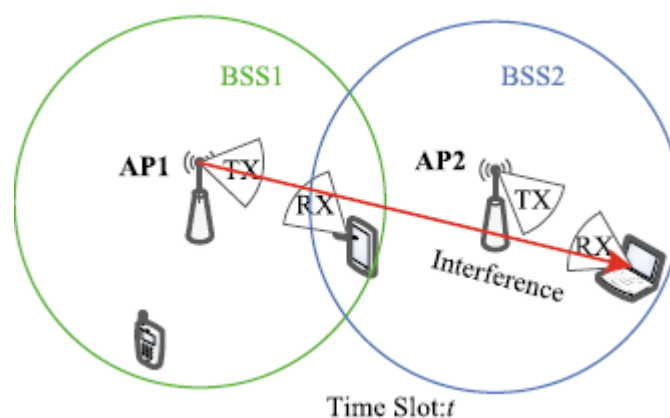


Figura 1-8. Esquema de las relaciones entre las diferentes frecuencias. [31]

### 1.4.3 Compartición de espectro.

Las expectativas de las características de comunicación de los sistemas móviles 5G necesitarán anchos de bandas mucho más grandes que los sistemas actuales. Como el espectro es el que es, y no hay más, es necesario compartirlo. Hay dos técnicas principales, distribuida y centralizada.

- La técnica de compartición de espectro distribuida necesita la relación entre nodos, que es el caso de comunicación entre dispositivos del punto siguiente.

- La técnica de compartición de espectro centralizada es la compartición de espectro gestionada desde un punto central. Cuanto más pequeñas sean las celdas, más se pueden reutilizar las frecuencias.

Otra característica importante de la tecnología 5G es que podrá usar el espectro de trabajo de una forma flexible y adaptativa. Además, la tecnología 5G podrá existir al mismo tiempo que otras tecnologías, en las frecuencias que tiene asignado cada tecnología y cada operador. En 5G, los operadores no operarán únicamente en la banda de frecuencia asignada dentro de un área geográfica, sino que será posible el compartir bandas de frecuencias, sobre la base de técnicas de radio cognitiva, como un sistema inalámbrico totalmente reconfigurable que cambie sus parámetros de comunicación automáticamente dependiendo de las demandas de la red y/o los usuarios. La tecnología 5G compartirá el espectro de trabajo con otras redes heterogéneas incorporando otras tecnologías inalámbricas (tales como Wi-Fi, LTE Advanced Pro, cmWave, mmWave, etc.). Todas las tecnologías podrán funcionar perfectamente sin interferencias y de forma transparente al usuario. Incluso, la capacidad de comunicarse los dispositivos entre ellos (D2D), sin pasar por la red móvil, será un avance que reducirá la carga de comunicación entre las BS, y permitirá una comunicación más fluida entre dispositivos. [32]

#### 1.4.4 Comunicación entre dispositivos.

La comunicación directa entre dispositivos es una de las características que se prevé que permita la tecnología móvil 5G. No es un tipo de comunicación nuevo implementado por la tecnología 5G, ya que las anteriores tecnologías de comunicación inalámbrica ya la permitían, pero con la tecnología 5G, se espera sufra un fuerte empuje. Esta comunicación puede ser de diferentes formas:

- Entre dispositivos, pero siendo controlada la comunicación por la BS.
- Entre dispositivos sin control directo de la BS.

Este tipo de comunicación descarga el tráfico que pasa por las BS, y por el núcleo de la red. [33]. Entre las principales mejoras que produce este tipo de comunicación están:

- Disminuye la latencia, ya que la comunicación no ha de pasar por la BS.
- Reduce la potencia consumida en transmisión, ya que normalmente los dispositivos que realizan este tipo de comunicación están suficientemente cercanos.
- Aumenta la eficiencia espectral, ya que las bandas de frecuencias que utiliza podrán ser reutilizadas.

Esto puede permitir una comunicación entre dispositivos que están alejados de la BS, dentro de la zona de cobertura, con un pequeño consumo energético, y con pocas pérdidas de propagación, y al no estar controladas por la BS, se reducen los caminos y los tiempos de propagación.

La red que gestione la comunicación entre dispositivos, debe permitir dos tipos de comunicación. Que los dispositivos determinen el tipo de comunicación al inicio de la comunicación, o que una vez establecida la comunicación, se pueda cambiar el modo de transmisión, pasando de comunicación directa entre dispositivos a comunicación gestionada a través de la infraestructura de acceso radio, típicamente la BS.

Basado en la comunicación entre dispositivos, existe la posibilidad de habilitar zonas de intercambio de datos, permitiendo que un gran número de usuarios compartan contenidos evitando cargar la red.

Uno de los problemas que se encuentra este tipo de comunicación es la seguridad, ya que, para evitar comunicaciones indeseadas, estas deben ser entre dispositivos reconocidos, en un área cerrada, y que hayan sido identificados previamente.

#### 1.4.5 Redes Ultra Densas (UDN).

Las necesidades de comunicación y la gran cantidad de dispositivos que se conectarán a las redes inalámbricas en el futuro, necesita que se establezcan redes ultra densas. Esto producirá interferencias entre los diferentes dispositivos, que deben ser solucionadas. Se está trabajando en dispositivos inteligentes capaces de decidir si enviar o no señales de comunicación, en función de las interferencias que recibe o qué produce, y tratando de reducir el consumo energético.

Al aumentar el número de BS, se reduce el tamaño de las celdas y aumenta la capacidad y la cobertura de la red. Al ser las celdas pequeñas aumenta también la posibilidad de reutilizar el espectro, y con ello aumenta notablemente la capacidad, que permitirá dar servicios a en zonas muy pobladas, tales como estadios, conciertos o edificios de oficinas, donde se produce una concentración de personas y dispositivos conectados a la red muy alta. Es conocido que las zonas donde se produce una alta concentración de personas, especialmente de forma puntual, es difícil suministrar el servicio, ya que no existen suficientes recursos para garantizar la comunicación en esos puntos.

No obstante, no es la solución única el aumento del número de celdas reduciendo el tamaño, ya que celdas pequeñas implican mayores interferencias, mayores problemas de movilidad. Si las celdas son pequeñas, el movimiento de los usuarios hace que aumenten los handovers.

Es decir, al aumentar el número de BS, la capacidad de usuarios por área no aumenta de forma lineal. Ya que, al existir mayor número de nodos, produce que aumenten las interferencias entre celdas más próximas, con lo que la eficiencia espectral disminuirá.

Otra de las consecuencias es que en lugares con muchos nodos por unidad de superficie, necesitan una gran carga de comunicaciones de señalización debido a que al ser los nodos pequeños habrá una gran cantidad de handovers que producirá la señalización que permita esos handovers. [30]

#### 1.4.6 Tecnologías de acceso multiradio.

Como se ha comentado anteriormente, el desarrollo de las redes 5G implicará el uso de nuevas bandas de frecuencias. No obstante, no desaparecerán todas las tecnologías anteriores, sino que deben convivir las tecnologías 5G, con la 4G y la 3G, y con posibilidad de comunicación entre dispositivos, dependiendo de las localizaciones donde existan cada una de ellas, al igual que ocurre actualmente. Incluso deben convivir con diferentes tipos de tecnologías wifi. No obstante, al igual que las primeras tecnologías ya no están operativas, y tan solo funcionan la 3G y 4G, poco a poco irá desapareciendo primero la 3G y posteriormente la 4G. Ello obliga a un esfuerzo de definición de la utilización de los diferentes espectros de frecuencias en función de la comunicación. Los dispositivos deberán incorporar diferentes tecnologías de comunicación según sea la que utilicen en cada momento. Otra de las características distintivas de 5G, es el network slicing, es decir, la posibilidad de "segregar" la red en varias sub-redes que pueden ser administradas de forma independiente. Esto es, teniendo como base la modularidad de las funciones de red y su virtualización, es posible dividir y aislar la red en distintas instancias lógicas, con distintas funcionalidades y rendimiento, compartiendo la misma infraestructura física. Esto permitirá adaptarse a los distintos requisitos de servicios de una forma muy rápida y eficiente, reduciendo riesgos y costes. Por ejemplo, para habilitar el coche conectado se necesita una latencia muy baja y alta redundancia. [32]

#### 1.4.7 Ondas milimétricas en redes móviles 5G.

La demanda de comunicaciones y características de las redes inalámbricas 5G son tales, que con las actuales bandas disponibles no es posible. Por ello las comunicaciones inalámbricas 5G se espera que se hagan en la banda de las ondas milimétricas. En esta banda se podrán usar anchos de bandas grandes que permitirán incrementar la capacidad de los canales, y reducir la latencia, así como aumentar considerablemente la velocidad de conexión a internet. Permitirá el uso de tecnologías como el MIMO masivo, y las coberturas de las estaciones base se verá reducida mucho.

Se espera el uso de frecuencias en la banda por encima de los 6 GHz, lo cual produce pérdidas importantes de propagación, ya que las pérdidas de propagación en espacio libre aumentan con la frecuencia. Esto obliga a posicionar las BS cerca de los dispositivos, es decir el uso de redes ultra densas con celdas muy pequeñas. Así mismo, el uso de longitudes de onda tan pequeñas, permite que los arrays de antenas se coloquen directamente en las placas base de los circuitos de los dispositivos.

Aunque las bandas de frecuencias en las ondas milimétricas actualmente no se han considerado viables para las comunicaciones debido a los problemas técnicos que suponían, debido sobre todas a las altas pérdidas de propagación, a la absorción de la lluvia y la no penetrabilidad en los objetos y paredes, si es cierto que cada vez se tienen más en cuenta para el uso en comunicaciones, debido a las posibilidades que ofrecen. Ello hace que ya se esté estudiando su uso en la banda de 60 GHz para redes interiores, tal como establece el estándar 802.11ad. En el World

Radiocommunication Conference 2019 (WRC-19) la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) planteó el estudio de las bandas de frecuencias de 24 a 86 GHz para analizar su posibilidad de uso en las redes 5G. [30]

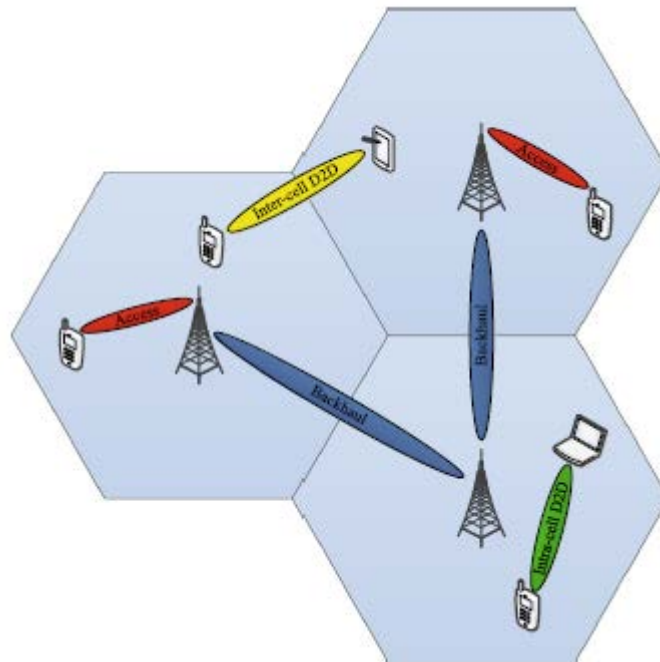
#### 1.4.8 Evolución de las redes troncales en 5G

Las redes móviles serán de celdas pequeñas, de forma que puedan dar el servicio de comunicaciones que se está demandando, y que se espera se dispare la demanda. Las comunicaciones en ondas milimétricas usando enormes anchos de banda permitirán comunicaciones de muchos gigabits por segundo, permitirán dar servicio a aplicaciones como son alta velocidad de transferencia entre dispositivos, transmisión en tiempo real, conexiones internet de gigabits por segundo, juegos inalámbricos, etc. Hay estudios que han conseguido en las bandas de 28, 38 71-76 GHz velocidades de transmisión por encima de los 10 GBits [31].

Las comunicaciones en celdas densamente pobladas, entre las BS y los dispositivos, en la banda de 28 y 38 GHz, con celdas de hasta 200 metros, permiten altas velocidades de comunicación con Calidad de Servicio (Quality of Service, QoS) óptimo. Se prevé que se permitirán las comunicaciones entre dispositivos (Device-to-Device, D2D), sin pasar por la BS, en dispositivos situados próximos, esto permite un ahorro de potencia y una mejora en la eficiencia espectral. Las comunicaciones en las redes móviles en la tecnología 5G se espera que sean en celdas pequeñas con comunicación directiva de las BS a los equipamientos de usuarios móviles permitiendo la comunicación D2D entre dispositivos cercanos.

Al usar en las redes de tecnología 5G celdas muy pequeñas, obligará a conectar estas BS de cada celda, (backhaul), a través de cable de fibra óptica, y serán muchas conexiones y en consecuencia muy costoso. En cambio, hacer la conexión de la BS backhaul de forma inalámbrica sería mucho menos costoso y más eficiente. Al disponer de ancho de banda disponible, las conexiones a 60 GHz entre las con arrays de antenas directivas, permitirá conexiones de varios Gigas Bits por segundo de velocidad de transmisión.

En la figura siguiente, número 1.9 se observa el esquema planteado.



**Figura 1-9. Arquitectura de redes celulares 5G con ondas milimétricas, y permitiendo comunicaciones D2D. [31]**

#### 1.4.9 Internet de las cosas. (IoT)

Algunas de las principales características de la tecnología 5G se espera que permita son, la conexión masiva de dispositivos, y entre dispositivos, con muy bajo consumo, conocido como el internet de las cosas (IoT), las comunicaciones con muy baja latencia, y las comunicaciones en banda ancha con muy alta velocidad.

El IoT es la conexión entre dispositivos, personas, empresas, a nivel global que afectará a todos los aspectos de la vida. Al ritmo actual, de conexiones, entre dispositivos, se espera que genere unas ganancias económicas millonarias, y en consecuencia es uno de los campos de inversión e investigación de las empresas. Los aspectos en los que generará unos cambios importantes son desde la actividad en las fábricas, hasta la salud, oficinas y los vehículos. Las tecnologías de conexión 5G se espera permita que los sensores instalados en los diferentes dispositivos, se conecten con los equipos e control que tomen las decisiones, y mejore y simplifique la mayoría de los aspectos de la vida cotidiana.





Figura 1-10. Evolución de las conexiones inalámbricas. [34]

Según la figura anterior, número 1.10, se espera que este escenario de conexiones dispare el número de dispositivos conectados a internet. Así en 1990 el número de dispositivos conectados a internet era normalmente uno por vivienda, normalmente el Personal Computer (PC). Hacia el año 2010 el número de dispositivos conectados a internet por viviendas se multiplicó por 10, con la aparición de los smartphones y el aumento de PC en las viviendas. Para el año 2030 se espera que el número de dispositivos conectados a internet en cada vivienda se multiplique por 100 ó 1000.

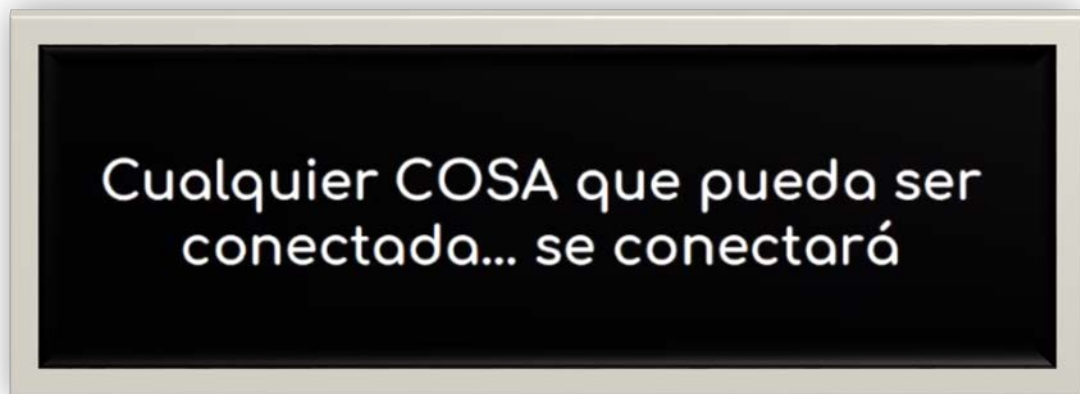


Figura 1-11. Frase resumen de la filosofía de Internet de las Cosas. [34]

La figura 1.11 expresa la filosofía a la que se tiende en los próximos años. Se espera que los sistemas inalámbricos 5G soporten un amplio rango de servicios. Uno de los ambientes de conexión en los que será importantes el IoT, será el Ultra-reliable low-latency communications (URLLC), que permite aplicaciones, entre otras, en las comunicaciones a vehículos. Este servicio tiene unos requisitos estrictos de

disponibilidad, confiabilidad y especialmente latencia, tanto en comunicación de datos como de información de control.

#### 1.4.9.1 Internet de las cosas en los edificios. (IoT)

Hace unos 20 años, en 1998, que la legislación de la Infraestructura Comunes de Telecomunicación, (ICT), determinó las características de equipos, y tipos de cableados que deberían llevar los edificios para integrarse en lo que se llamaba en su día la época digital. Se espera que, en un futuro no muy lejano, se determinen las nuevas características de los equipos, infraestructura, sensores, que a través de los nodos IoT, permitan a los edificios adaptarse a la nueva era digital que se impone desde el 5G.

Así, igual que la ley de ICT ayudó a la implantación de tecnologías como la fibra o el cableado UTP en el interior de los edificios, la nueva legislación al respecto deberá contemplar que los edificios vayan provistos de la infraestructura necesaria para que puedan trabajar como nodos IoT, de forma que a través de ellos se canalice el flujo de datos. Al igual que se está hablando de las ciudades inteligentes (Smart City), la idea es que estas ciudades estén formadas por edificios inteligentes (Smart Buildings).

Un edificio inteligente, según Telefónica, es un edificio que gestiona inteligente y remotamente sus automatismos para mejorar el confort, el mantenimiento, la accesibilidad, la salubridad y la seguridad. Según esta definición los principales parámetros en los que se debe basar el edificio inteligente es en la conectividad, plataformas de gestión y seguridad.

Las características que deben cumplir los edificios Inteligentes son:

- La conectividad consistirá en que los edificios estén conectados entre sí, y con una gestora central que los gestione. La conexión se podrá hacer cableada o vía radio, en un futuro a través de la red 5G, o convirtiendo al propio edificio en un nodo IoT.
- Las plataformas de gestión a la que se conectarán los edificios gestionarán la comunicación entre ellos y cualquier parte del mundo en tiempo real.
- La seguridad de toda esta información será un elemento crucial en el tratamiento de datos, de forma que los datos obtenidos de los nodos del edificio sean protegidos ante amenazas.

La utilización del edificio inteligente como un nodo IoT de la ciudad inteligente, producirá un intercambio de información entre los edificios que permitirá analizar el entorno en tiempo real para mejorar la gestión de las ciudades y del propio edificio. Para ello los edificios deberán estar dotados de las infraestructuras necesarias que les permitan adaptarse a las tecnologías existentes, a las que vendrán en un futuro próximo, como el 5G, y las que vendrán en un futuro más lejano, sin necesitar excesivos gastos para modificar las tecnologías existentes a las nuevas. Los edificios tienen una vida media de más de 50 años, y la tecnología de las comunicaciones y la informática, en 50 años se espera que sea totalmente nueva.

La ley de ICT de telecomunicaciones ya prevé la instalación de equipos de domótica en el interior de los edificios, aunque no son obligatorias actualmente su instalación. Con la tecnología IoT en el interior de los edificios, existirán muchos dispositivos conectados que harán la vida más fácil a los usuarios, será como una domótica a lo grande.

Problema de la seguridad: Esta conectividad inmensa de los dispositivos, es una puerta abierta a las amenazas de los Hackers, que los pueden usar como una zona de entrada a nuestros sistemas. Este tendón de Aquiles en la tecnología IoT en el interior de los edificios hace que el tema de la seguridad sea uno de los campos en los que se esté investigando antes de la implantación de la tecnología. Existen diferentes estudios de ciberseguridad de los sensores de diferentes empresas, como la estudiada por la empresa “Aplicaciones” que consiste en usar algunos sensores de la red IoT, además de como nodos como Firewalls, y el resto de los nodos se conectan a la red a través de estos nodos Firewalls.

Un concepto que toma fuerza en la idea de Ciudad Inteligente, es el edificio conectado, como elemento clave. Una de las definiciones de ciudad inteligente, es la de aquella que es capaz de conectarse con todos los objetos internos de la ciudad. Y dentro de ella están los edificios. La conexión de los edificios permitirá ayudar en el buen gobierno y en la mejora de los ciudadanos.

Para la Unión Europea se deben monitorizar aspectos como la contaminación atmosférica, la eficiencia energética, y la conectividad del IoT, y gestionarlos con ayuda de la Inteligencia Artificial, la supercomputación y la ciberseguridad. Teniendo en cuenta que pasamos más del 85% del tiempo dentro de los edificios, está claro que los edificios son los elementos claves para las ciudades, y la conexión entre ellos. Por ello existen trabajos y planes de normalización la conexión entre los edificios, acerca qué datos recopilarán y los requisitos que deben cumplir para ser considerados como Nodos IoT.

Los edificios serán unos generadores de alarmas de situaciones críticas, tales como incendios, nivel de CO<sub>2</sub>, y peligros en general, pero también recopilarán información acerca del edificio, como consumo energético, agua, etc..

Incluso se dotará al edificio de sensores y sistemas inteligentes, capaces de tomar decisiones ante situaciones definidas.

Otro de los parámetros importantes que debe tener en cuenta la red IoT es la calidad de servicio (Quality of services, QoS). Actualmente conviven diferentes tecnologías inalámbricas en el interior de los edificios, 4G, WiFi, etc.. y dentro de pocos años además convivirán con el 5G.

La gran cantidad de dispositivos IoT que estarán conectados en el interior de los edificios obligará a estudiar la calidad de servicio que ofrece cada tecnología, para que los usuarios puedan decidir cual contratar, y así cada vez sea menos corriente la frase de “la red wifi no va bien”.

## 1.5 Estado actual y estandarización de 5G.

### 1.5.1 Estado actual en España. Plan Nacional 5G.

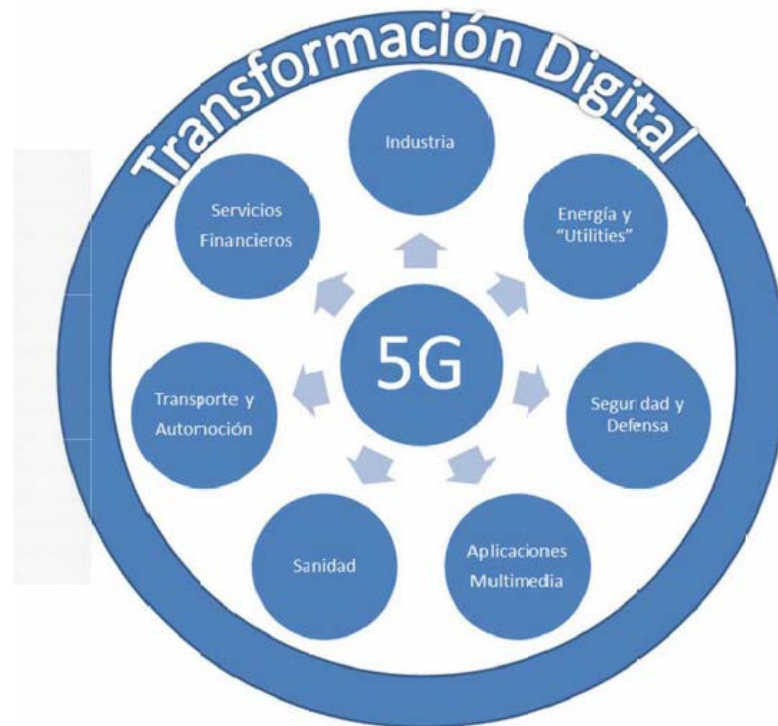
El desarrollo tecnológico al que está avanzando la sociedad necesita de una tecnología y servicios para la próxima década, que se sustentará en la tecnología 5G. Esta tecnología cambiará la economía, la forma de comunicarse, incluso las tareas más comunes de nuestra vida cotidiana.

Aunque esta tecnología está aún por definir en todos sus parámetros concretos, es necesario realizar pruebas pilotos y encuestas a los operadores, fabricantes y proveedores de servicios que permitan ir conociendo cuales son las expectativas que nos esperan. Por ello el Ministerio de Industria Comercio y Turismo ha creado el Plan Nacional 5G, que le permita definir los estándares, determinar las tecnologías que se usarán, y experimentar con las tecnologías que se usarán antes de la implantación definitiva del 5G.

El ministerio pretende que nuestro país se incorpore a la tecnología 5G al mismo tiempo que el resto de los países europeos. Para ello en el año 2017, el ministerio realizó una consulta a los operadores, fabricantes, y asociaciones, entre otros, y como resumen se recogió que las principales influencias de la tecnología 5G sería en: Industria, Seguridad y Defensa, Automoción, Salud y Sanidad, Media y Entretenimiento, Energía y Transporte y Servicios Financieros. Y concretando el interés en España, se espera que influya en aplicaciones referidas al sector turístico, las aplicaciones IoT en cuanto a las diferentes regiones, y el sector automovilístico. Concretamente en España se espera que tenga especial relevancia la tecnología 5G en:

- Transformación digital de la producción. Se espera que las empresas utilicen la tecnología 5G, concretamente el IoT para las cadenas de producción, incluso la conectividad que existirá entre los fabricantes y clientes. No hay que olvidar que España es el 2º mayor fabricante de automóviles de Europa y el 8º a nivel mundial, es el 1ª fabricante europeo de vehículos comerciales y que existen 17 plantas de fabricación instaladas en territorio español.
- La tecnología en los coches inteligentes es una de las aplicaciones que tendrá gran importancia en nuestro país debido a la importancia que tiene la fabricación de coches en nuestra economía.
- Conectividad de los territorios. Permitirá la conexión entre las diferentes administraciones y servicios que permitan una mejor gestión de los mismos, a nivel de regiones e incluso de ciudades.
- Uso en la ganadería y agricultura. El uso de sensores conectados permitirá una rentabilidad mayor en nuestra agricultura y ganadería, se podrá obtener información en tiempo real de los parámetros que permitan optimizar la producción.

En la figura número 1.12 se presentan los diferentes campos donde se espera que la tecnología 5G tenga especial relevancia.



**Figura 1-12. La tecnología 5G y la transformación digital. [35]**

La introducción gradual de la tecnología 5G, usará las estructuras de la red troncal de la 4G, presentando las mejoras en la red móvil. De esta forma se rentabilizarán las inversiones realizadas por los operadores, y el riesgo financiero al que se deben someter, como consecuencia de las nuevas tecnologías será menor. Posteriormente se introducirá la red troncal 5G.

El plan Nacional 5G en coordinación con el resto de países de la Unión Europea, ha realizado las diferentes acciones:

- Licitación de la banda de 3,4 a 3,8 GHz.
- Licitación de la banda de 1452 a 1492 MHz.
- Liberalización de la banda de 700 MHz.
- Así actualmente en España estamos ahora mismo inmersos en el segundo dividendo digital, consistente en dejar libre la banda de los 700 MHz de conexión para la TDT, para reutilizar la banda de frecuencia en comunicaciones móviles.
- Estudiar la posible utilización de la banda de 26 GHz.
- Convocar proyectos piloto para estudio experimental de posibles despliegues de redes 5G.
- Estudio de medidas regulatorias en las redes 5G en cuanto a seguridad, y calidad de los servicios.

- Creación de una oficina técnica que difunda y regule las actuaciones del Plan Nacional 5G, así como participar en los estándares internacionales de las normas de 5G.

### 1.5.2 5G en la Unión Europea

La Unión Europea vela por que todos los países que la integran se incorporen a la nueva tecnología 5G. Entre las acciones principales que recomienda la Unión Europea a los países que la integran, se encuentran la de promover proyectos pilotos, recomendar que se establezca una cantidad de espectro suficiente para la 5G, mantener la nueva tecnología 5G operativa con las anteriores, facilitar la instalación de pequeñas celdas, y favorecer el despliegue de fibra óptica.

Así mismo ha determinado el uso de las bandas de frecuencias que se dedicarán en el futuro próximo en los países de la Unión Europea, que se muestran en la siguiente figura, número 1.13.

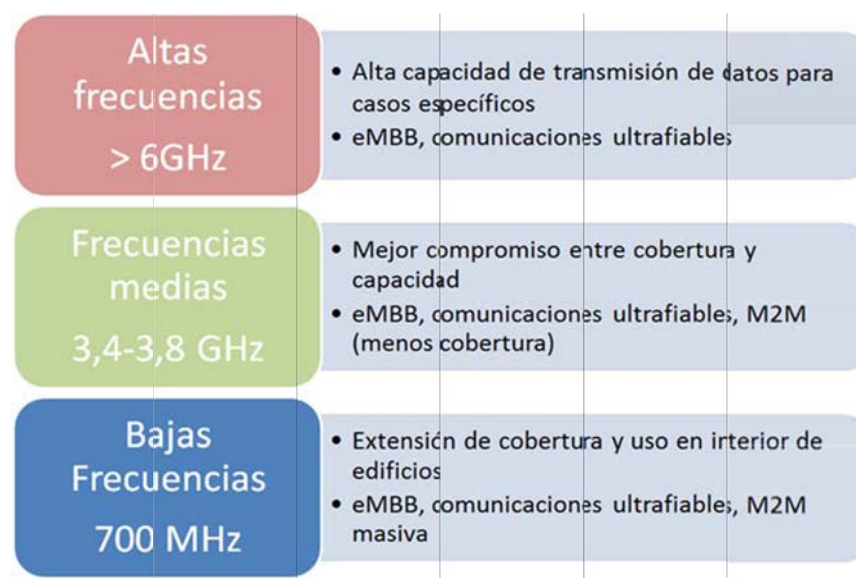


Figura 1-13. Bandas de frecuencias identificadas para 5 G en Europa y posibles casos de uso. [35]

### 1.5.3 Estandarización de 5G

A pesar de la gran expectativa de comunicación que promete la tecnología 5G, aún no están totalmente definidas las características que tendrá la tecnología, por ello las asociaciones de investigadores y concretamente 3rd Generation Partnership Project (3GPP), definió en 2016 la tecnología 5G para radio para tres casos principales, detallados en la figura número 1.14:

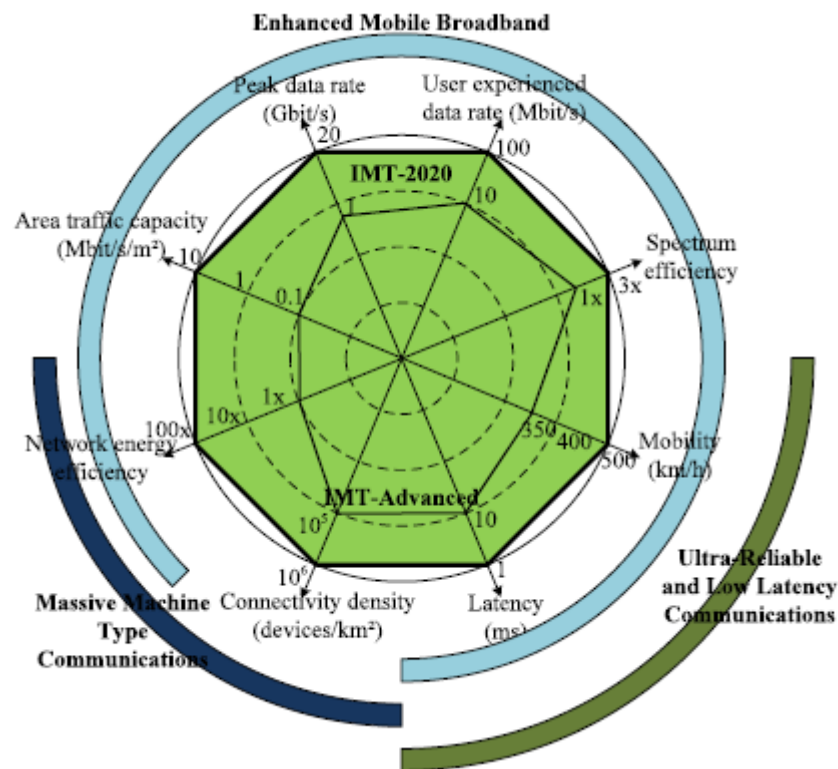


Figura 1-14. Escenarios de uso de 5G. [3]

La figura 1.14 presenta la mejora de la estandarización de la International Mobile Telecommunications-2020 (IMT-2020), sobre la IMT-Advanced. Pero sobre todo presenta los tres casos principales de conexión de radio en 5G definidos por 3GPP. En la figura número 1.14 se presenta las características necesarias en la tecnología 5G para cada uno de los posibles tres estados de conexión principales, y lógicamente se solapan entre ellos. Los tres posibles estados de conexión son:

- 1) Enhanced Mobile Broadband (eMBB); son los servicios de comunicación de móviles, que requiere alta velocidad de transmisión.
- 2) Massive Machine Type Communications (mMTC); es la conectividad de los dispositivos, conocido como el internet de las cosas (IoT). Requiere que permita la conexión simultanea de muchos dispositivos.
- 3) Ultra Reliable Low Latency Communication (URLLC). Es la comunicación necesaria para aplicaciones que requieran baja latencia de comunicación.

En febrero de 2017, el grupo de estudios de radiocomunicación de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU) en su recomendación ITU-R 56-2, definió la International Mobile Telecommunications-2020 (IMT-2020), como las especificaciones que deben cumplir las interfaces de radio de los sistemas móviles de las tecnologías 5 G, para dar servicio de radio en los tres escenarios principales, comentados en los 3 puntos anteriores.

Esta recomendación determina las características mínimas necesarias que deben cumplir los sistemas de redes móviles 5G, que en resumen son:

- Velocidad máxima de pico, como la velocidad que un móvil debe poder recibir de pico, que debe ser como mínimo de 20 GBits/sg en el enlace descendente y 10 GBits/sg en el enlace ascendente.
- Eficiencia espectral de pico, definida como la máxima velocidad de datos por ancho de banda, medida en Bits/sg/Hz. Esta velocidad debe ser como mínimo de 30 Bits/sg/Hz en el enlace descendente, y de 15 Bits/sg/Hz en el enlace ascendente.
- Capacidad del tráfico por área, es el rendimiento de tráfico servido por área medido en MBits/sg/m<sup>2</sup>. Las especificaciones mínimas son de 10 MBits/sg/m<sup>2</sup>, en el interior de edificios.
- Latencia en el plano de usuario, definida como el tiempo transcurrido desde que la fuente emite una señal hasta que el receptor la recibe. Los valores mínimos son de 4msg para enlace eMBB, y 1 msg para enlace URLLC.
- Densidad de conexión, entendida como el número de dispositivos funcionando con una calidad de servicio mínima por km<sup>2</sup>. El número mínimo de conexiones es de 1.000. 000 dispositivos por km<sup>2</sup>.
- Movilidad, entendida como la máxima velocidad a la que se puede mover un móvil, manteniendo un nivel aceptable de calidad de servicio. Así, los valores se estipulan como la velocidad de datos por ancho de banda mínima que se puede permitir, en función del tipo de conexión y velocidad. En conexión en el interior de edificios, se permite un mínimo de 1,5 Bits/sg/Hz, con una velocidad máxima de 10 km/h, en conexión en el exterior, en ambientes urbanos, se permite un mínimo de 1,2 Bits/sg/Hz, con una velocidad máxima de 30 km/h, en conexión en el exterior, con ambientes rurales, se permite un mínimo de 0,8 Bits/sg/Hz, con una velocidad máxima de 120 km/h.
- Ancho de banda. El ancho de banda del sistema será de al menos 100 MHz.

#### 1.5.4 Proyectos y referencias que trabajan en 5G.

Muchos grupos de investigación en todo el mundo están trabajando para definir los estándares de la tecnología 5G.

Los campos de trabajo son tan extensos como la propia tecnología 5G, como los estudios de modelados de canal, arquitectura de sistemas, software, etc. Algunos de éstos proyectos de investigación son:

- Mobile and Wireless Communications Enablers for the Twenty–twenty Information Society (METIS) [36], en abril de 2015 publicó un proyecto que describe la arquitectura, el modelo de canal y sus testeadas evaluaciones de



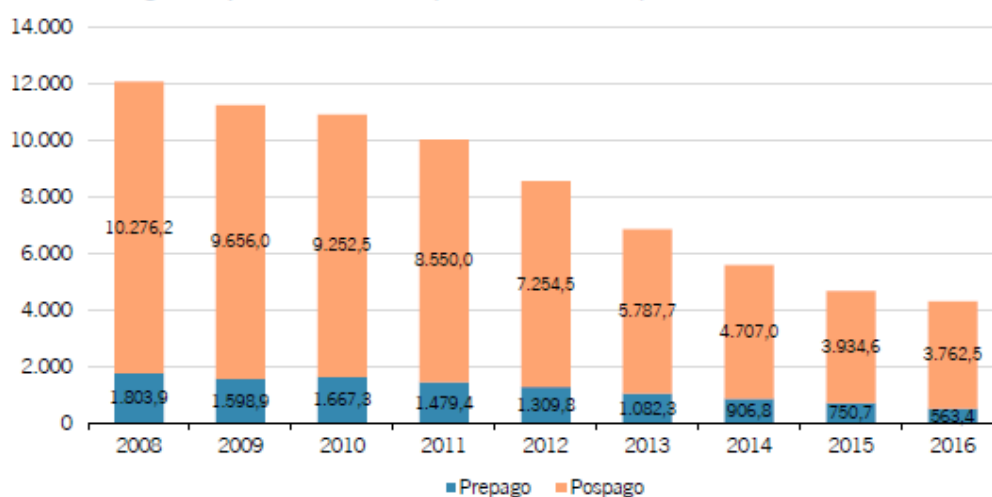
la tecnología 5G. Hicieron simulaciones en las que evalúan el rendimiento de parámetros como el volumen de tráfico por área, o el uso de datos medio en la hora cargada. Presentaron resultados de acceso de radio con tiempos de latencias bajas.

- 5th Generation Non-Orthogonal Waveforms for Asynchronous Signaling (5GNOW) [37], presentó investigaciones de estructuras 5G, muy bajos tiempos de latencia, y formas de onda viables para la tecnología 5G.
- Enhanced Multicarrier Technology for Professional Ad-Hoc and Cell-Based Communications (EMPhAtiC) [38], investiga en transmisión Múltiples Entradas Múltiples Salidas (MIMO). Ecuilibración y desarrollo.
- Network of Excellence in Wireless Communications (NEWCOM#) [39], trabajan buscando los límites de la comunicación inalámbrica en velocidad, consumo de energía y eficiencia del canal en función de la tecnología elegida.
- Un consorcio americano encabezado por la Universidad de Nueva York, que entre otras investigaciones tiene desarrollado un simulador software que calcula los parámetros de propagación de sistemas MIMO en frecuencias de hasta 100 GHz, en diferentes entornos de propagación con hasta 50 antenas. tienen estudios acerca de modelos de propagación en ondas milimétricas y han realizado pruebas de pérdidas de propagación en la ciudad de Nueva York.
- El “3rd Generation Partnership Project” (3GPP TR) 38.901[7]), que trata de proporcionar modelos de canal de 0,5-100 GHz basándose en una modificación del trabajo realizado en 3GPP's para el desarrollo de modelos de canal de 6 a 100 GHz TR 38.900[8]. Los documentos del 3GPP TR son un estándar de facto para la industria y están actualizándose continuamente.
- Modelo de canal 5G (5GCM [40]), un grupo ad-hoc de 15 empresas y universidades que desarrollaron modelos basado en campañas de medidas muy extensas y colaboraron con 3GPP para TR 38.900.
- Otro gran proyecto de investigación patrocinado por el Unión Europea. MmMAGIC [41]. Este proyecto fue cofinanciado por 5GPPP programa la Comisión Europea, que reúne a proveedores de móviles principales (Samsung, Ericsson, Alcatel-Lucent, Huawei, Intel, Nokia), los principales operadores europeos (Orange, Telefonica), a diferentes centros de investigación Institutos y universidades (Fraunhofer HHI, CEA LETI, IMDEA Networks, universidades Aalto, Bristol, Chalmers y Dresden), a los proveedores de equipos de medición (Keysight tecnologías, Rohde & Schwarz) y una PYME (Qamcom). Este proyecto, mmMAGIC fue dirigido y coordinado por Samsung. Ericsson actuó como gerente técnico de Intel, Fraunhofer HHI, Nokia, Huawei y Samsung cada uno lideró uno de los cinco paquetes de trabajo técnico del proyecto.

## 1.6 Análisis del mercado de las telecomunicaciones.

Los precios de las líneas móviles se han ido reduciendo los últimos años y se espera que se sigan reduciendo. La figura 1.15, del Informe Económico Sectorial de las Telecomunicaciones y el Audiovisual del año 2017 de la Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia (CNMC), revela que los ingresos de las empresas medios anuales por líneas móviles se reduce cada año. Esto no quiere decir que se reduzcan sus ingresos totales, ya que el número de líneas no para de aumentar. Se ve en la siguiente figura número 1.16, cómo los ingresos por tráfico de voz disminuyen exponencialmente desde el año 2010 hasta el 2016, y sigue actualmente con la misma tendencia. Estos ingresos se compensan con el aumento, también exponencial, del número de abonados, y del tráfico de datos.

Evolución de los ingresos por tráfico de voz (millones de euros)

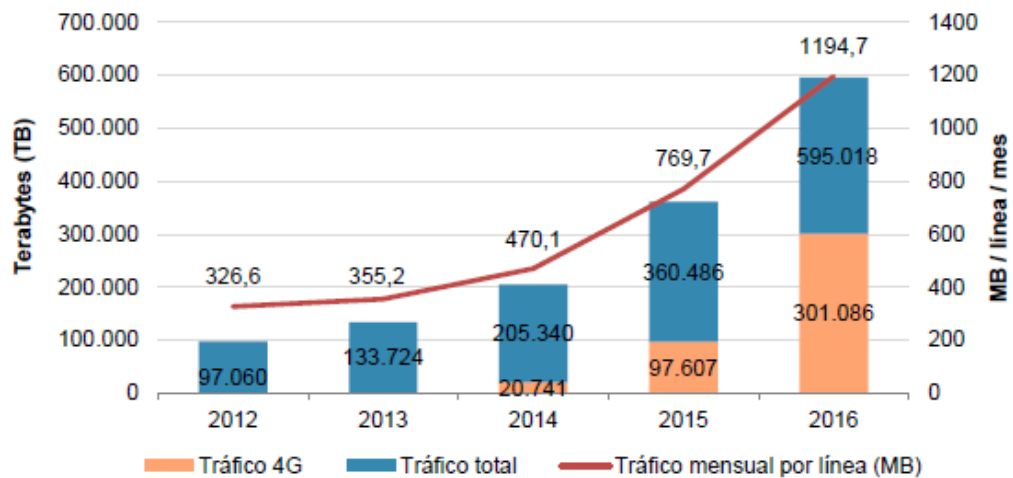


Fuente: CNMC

Figura 1-15. Evolución de los ingresos de las empresas por líneas móviles. [42]

Como se ha introducido, el aumento del tráfico de datos de los abonados cada año es exponencial, y se espera que el aumento sea mayor con las nuevas tecnologías 5G y el IoT. En la figura número 1.16 se observa el crecimiento del tráfico total mensual medio por línea a lo largo de los años, según el informe de la CNMC. En la figura se observa el incremento exponencial de tráfico de datos y total.

Tráfico total y mensual por línea (TB y MB/línea/mes)

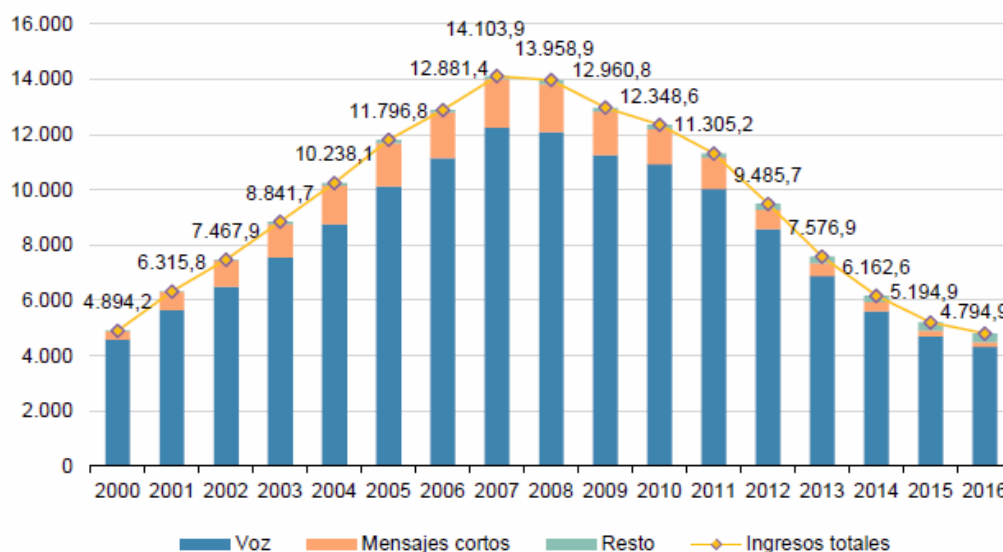


Fuente: CNMC

Figura 1-16. Tráfico medio por línea a lo largo de los años. [42]

### 1.6.1 Evolución de las conexiones móviles.

Los ingresos obtenidos por las empresas operadoras de telefonía móvil, por los conceptos de voz y mensajes, se redujeron en el año 2016, a pesar que aumentaron el número de contratos respecto a años anteriores. Esto es debido principalmente a el descenso de los precios de los servicios cobrados por las operadoras, y al aumento de tráfico de datos, que hace que disminuya el tráfico de voz y mensajes. Estos ingresos para los operadores obtuvieron su valor máximo en el año 2007, y la tendencia es continuar a la baja como se puede apreciar en la figura número 1.17, del informe de la Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia.

Evolución de los ingresos por servicios finales (millones de euros)<sup>70</sup>

Fuente: CNMC

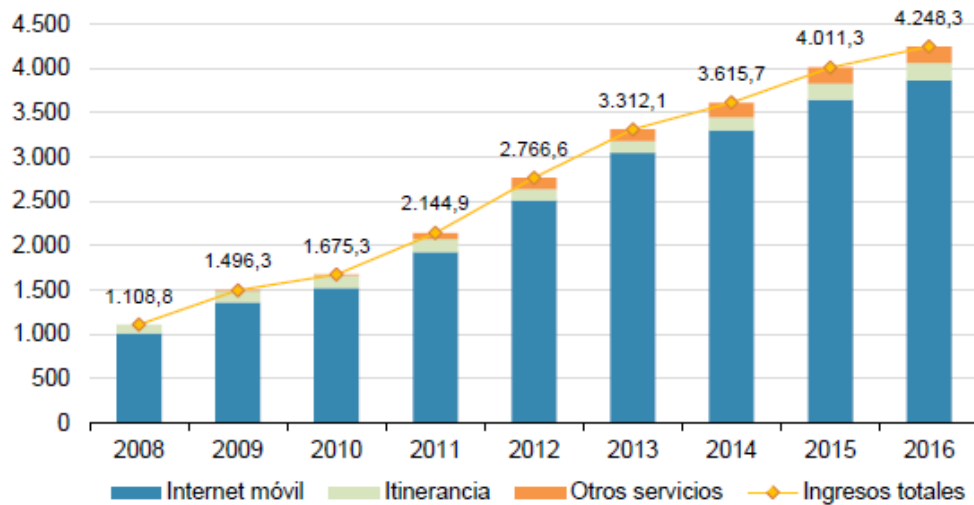
**Figura 1-17. Ingresos obtenidos por los operadores por servicios de voz y mensajes. [42]**

En consecuencia, desde el año 2007, el ingreso medio por línea de los operadores móviles, ARPU (Average Revenue per User), también se ha reducido cada año, con la tendencia a seguir reduciéndose.

El número de líneas de telefonía móvil lleva sufriendo un incremento desde principio del siglo, aunque en los últimos años las líneas que más han aumentado han sido las de modalidad pos pago, especialmente con los operadores móviles virtuales. El tráfico de mensajes en los móviles ha descendido drásticamente en los últimos años, debido al auge de la banda ancha en los móviles, con lo que el uso de mensaje se ha sustituido por servicios de mensajería instantánea como WhatsApp. Así como desciende continuamente los ingresos por voz y mensajes, el acceso de los usuarios por banda ancha móvil aumenta cada año, tanto a través de la tecnología 4G, como por acceso a través de redes wifi.

En la figura número 1.18, siguiente se puede apreciar los ingresos de los operadores los últimos años por banda ancha móvil.

Evolución de los ingresos por banda ancha móvil (millones de euros)



Fuente: CNMC

Figura 1-18. Ingresos obtenidos por los operadores por banda ancha móvil. [42]

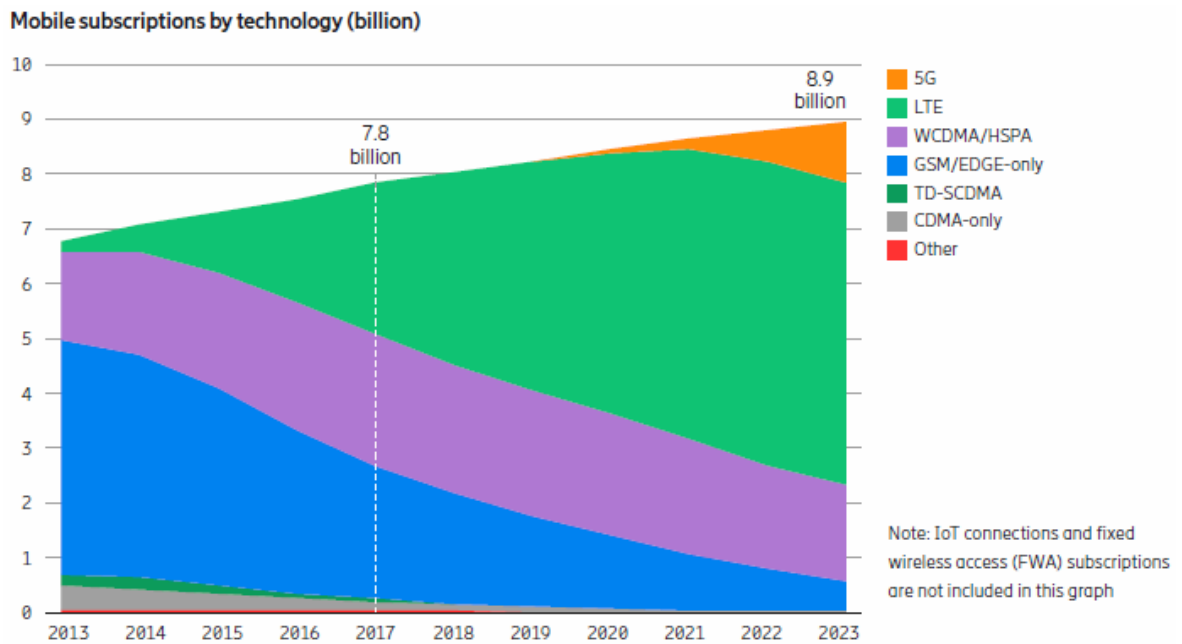
Viendo la figura 1.18, está claro que las conexiones de banda ancha móviles son un futuro comercial muy interesante, y que es por donde se está desarrollando tanto las necesidades de la sociedad como las expectativas económicas de las empresas suministradoras de servicios.

Así mismo el tráfico de datos móviles también sufre un incremento exponencial en los últimos años debido entre otras causas a que la tecnología 4G permite su uso de forma fácil.

Por ello la tecnología de conexión de datos móviles 5G que está en pleno proceso de investigación y definición, es tan necesaria, ya que se espera que el tráfico de datos a través de banda ancha móvil siga con el crecimiento exponencial, y la tecnología existente actualmente, 4G, no será capaz de cubrir las necesidades de tráfico de datos que se espera demande las sociedades avanzadas.

Así mismo, el número de suscripciones a telefonía móvil crece un 4% cada año, pero el crecimiento de suscripciones a banda ancha móvil crece un 20% cada año, a nivel mundial, siendo los países donde el crecimiento es mayor, India y China. De hecho, el número de móviles existentes es mayor que el número de personas en muchos países.

En muchos países, como Estados Unidos, Japón y Corea de Sur, se espera con impaciencia el lanzamiento de la tecnología 5G, y ello hace que se está impulsando la estandarización de ésta tecnología. Las previsiones a nivel mundial acerca de las tecnologías que se usarán de conexiones Móviles, se aprecia en la figura número 1.19 de un informe de Ericsson y se espera que para el 2023 la gran mayoría de conexiones de este tipo sean con la tecnología 5G.



**Figura 1-19. Ingresos obtenidos por los operadores por banda ancha móvil. [43]**

Así se espera para 2023 que el 95% de las suscripciones a móviles sean suscripciones de banda ancha.

Los dispositivos de conexión a banda ancha móvil deben ser capaces de conectarse en todas las bandas disponibles. Así como la mayoría de los móviles actuales se pueden conectar con tecnología GSM, 3G, o 4G, en sus bandas de frecuencias correspondientes, cuando se instale la tecnología 5G, que lo hará en frecuencias superiores, los móviles de conexión banda ancha deberán estar preparados para conectarse a esas frecuencias y a las de las tecnologías anteriores. Esto producirá que los dispositivos sean cada vez más sofisticados, con lo que implica ello. No obstante, la tecnología 5G no se espera que se implante por igual en todas las regiones del mundo, al igual que actualmente no está implantada las tecnologías 4G por igual en todo el mundo, como podemos ver en la figura 1.20 de Ericsson.

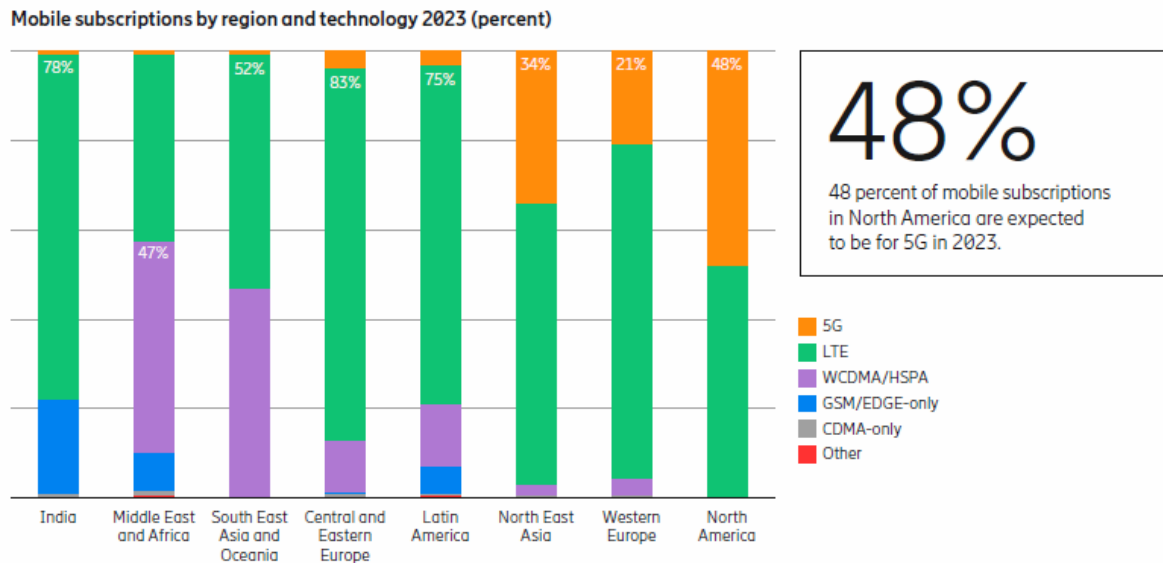


Figura 1-20. Tipo de tecnologías de conexión móvil banda ancha por regiones del mundo. [43]

De todo el tráfico móvil que se espera que crezca de forma exponencial, tal como viene haciendo los últimos años, el tipo que más se usa actualmente es el de vídeo. Y de todo ello se espera que el tráfico de datos, para el año 2023 sea servido por la tecnología 5G.

### 1.7 Organización de la tesis.

En esta tesis primeramente se plantea el contexto y el estado del arte actual donde se enmarca la tesis, a continuación, se realizan de manera consecutiva estudios de los sistemas MIMO, sistemas MIMO Distribuidos (D-MIMO) y sistemas MIMO Distribuidos Masivos (DM-MIMO). Se prosigue con un estudio de la influencia de la potencia en los sistemas anteriores para terminar abordando el consumo energético en estos sistemas.

Así en este capítulo de introducción, se hace un resumen de la evolución de las tecnologías de conexión radio móviles, y las principales características técnicas que tendría la tecnología 5G en un futuro próximo. También se hace una sinopsis del contexto social y económico de la tecnología 5G, así como una breve enumeración de grandes proyectos y grupos de investigación inmersos en el desarrollo de la tecnología 5G en el mundo.

**En el capítulo 2** se introduce el canal de propagación y la influencia que tiene éste en la capacidad del enlace de comunicaciones. Se analizan los diferentes modelos que existen del canal de propagación, así como los diferentes simuladores que existen del canal de propagación. Se describen los métodos utilizados para obtener las matrices del canal de propagación de los diferentes sistemas MIMO Y DMIMO. Para finalizar el capítulo 2 se realiza un primer análisis de diferentes sistemas SIMO, MIMO y DMIMO.

**En el capítulo 3** se realiza un análisis de los primeros sistemas DM-MIMO analizando la influencia de la correlación sobre la capacidad del sistema. Para

realizar este análisis se emulan más de 50 escenarios diferentes en los que se varía el número de antenas y la correlación entre las mismas.

**En el capítulo 4** se implementa un código para poder emular el balance de potencia entre las distintas estaciones base, es decir, poder analizar cómo se comporta la capacidad del sistema global en función de la potencia que llegue desde cada estación base. Se realiza la emulación de más de 100 escenarios distintos calculando la varianza entre las potencias que llegan de cada BS y analizando la influencia de la varianza en la capacidad.

**En el capítulo 5** se ha implementado un sistema que permite analizar sistemas DM-MIMO a partir de matrices del canal de propagación. Se ha realizado el análisis de más de 1000 escenarios que ocupan más de 1 Terabits. Estas emulaciones contemplan un gran número de entornos diferentes con diferentes condiciones de visibilidad y diferentes bandas de frecuencia.

**En el capítulo 6** se implementa una red de comunicaciones 5G, utilizando todos los sistemas anteriores, se emulan estaciones base. Se utilizan algoritmos de optimización para el apagado y encendido de estaciones base con el objetivo de mejorar la eficiencia energética. Estos algoritmos de optimización hacen uso de todos los cálculos del canal de comunicaciones desarrollados en los capítulos anteriores para calcular la capacidad del sistema. Por tanto, el objetivo es maximizar la capacidad del canal de comunicaciones, mientras se disminuye el consumo energético.

Finalmente, **en el capítulo 7** se plantean las conclusiones y líneas futuras que se han extraído de la realización de esta tesis. Se termina este capítulo mostrando la diseminación de resultados realizada por el autor en revistas y congresos.

En el anexo A se presentan todas las referencias que se han utilizado a lo largo de esta tesis mientras que en el anexo B se presentan todas las figuras, tablas y acrónimos utilizados en la tesis.



## 2. EL CANAL DE COMUNICACIONES.

### 2.1 Introducción

Las características de las comunicaciones han venido marcadas por el entorno donde se realizan, es decir, el canal de comunicaciones es el medio que conecta al transmisor con el receptor. Las características de este canal de comunicación dependen del medio físico a través del cual se realiza la transmisión. Pueden ser comunicaciones guiadas por medio físico (un cable u otro medio físico conecta transmisor y receptor) o comunicaciones no guiadas (se propagan a través del aire). Para permitir una movilidad del usuario (receptor) se desarrollan las comunicaciones móviles donde el canal de comunicaciones es el aire. Por tanto, desde un principio de las comunicaciones móviles, se ha hecho necesario el estudio de la propagación de las ondas electromagnéticas a través del aire, es decir, el estudio del canal de propagación.

Los primeros estudios del canal de propagación se hicieron para transmitir las señales de radio. En estos primeros estudios ya se vio la enorme dependencia del comportamiento del canal de propagación en función de la frecuencia de transmisión. En los últimos 50 años se ha estudiado con detalle el comportamiento de los canales de propagación para comunicaciones móviles por debajo de 6 GHz y como repercutía las características del canal de propagación en los sistemas de comunicaciones. Sin embargo, los estudios del canal de propagación por encima de los 6 GHz se están desarrollando en estos momentos y es importante estudiar la influencia que tendrá el canal de propagación en las comunicaciones.

Es necesario utilizar las frecuencias de las ondas milimétricas para utilizar el gran ancho de banda disponible que existe en esas frecuencias. En esta banda de frecuencia se tienen problemas de transmisión de señales, como son altas pérdidas de propagación y sensibilidad al bloqueo, que no eran tan cruciales en las bandas de frecuencias bajas, utilizadas por las tecnologías actuales.

Los principales retos o problemas que deben resolver los investigadores para poder desarrollar la tecnología 5 G relacionados con el canal de propagación, son:

- **Alta atenuación.** Se han realizado numerosos estudios y medidas de las atenuaciones de propagación de las señales en frecuencias de ondas milimétricas, que evidencian que las señales se atenúan mucho debido a las pérdidas de propagación con la distancia y a la atenuación de la lluvia. Esto obliga a trabajar con celdas de pequeño tamaño, de máximo 200 metros de diámetro. Los estudios y medidas se han realizado en las principales frecuencias de propagación, como son 28, 60 y 73 GHz. Así mismo se deduce de los estudios, que las propagaciones a considerar son las de

visibilidad directa (Line of Sight, LOS), ya que las propagaciones sin visibilidad directa (NLOS), están muy atenuadas [31] [44].

- **Perdidas de penetración elevadas.** La difracción en los obstáculos de las ondas electromagnéticas se produce principalmente cuando el obstáculo es de menor tamaño que la longitud de onda de la señal radiada. Trabajando con ondas milimétricas, las longitudes de onda son pequeñas y al encontrarse con obstáculos no se produce la difracción, sino que se bloquea la señal. Existen medidas que demuestran que, en la banda de frecuencia de unos 60 GHz las pérdidas de penetración son elevadas, y al pasar al través de las paredes o cristales opacos y las personas humanas somos un obstáculo que impide la propagación de las ondas.
- **Bloqueo de señal.** El cuerpo humano bloquea la señal y produce zonas de sombra en las comunicaciones. Esto ocurre especialmente en las comunicaciones en el interior de los edificios. Existen diferentes investigaciones para solucionar este problema, desde poner muchos puntos de acceso, lo cual es poco viable, a conmutar dinámicamente entre los caminos con conexión más fuerte entre los puntos de acceso y el equipamiento de usuario en movimiento en el interior de los edificios. En general, las comunicaciones, en el interior de los edificios debe ser con visibilidad directa, LOS, ya que las comunicaciones sin visibilidad directa sufren importantes atenuaciones.
- **Variabilidad del canal.** Al moverse el usuario, produce que se cambien las condiciones del canal de comunicación, de forma que solo al alejarse o acercarse el usuario a la BS, aumenta o disminuye la capacidad. Otro de los problemas asociados a la movilidad de usuarios es que aumenta muchos los Handover y las cargas de transferencia de datos de unas BS a otras, especialmente en el interior de los edificios, que las celdas son de muy pequeño tamaño.
- **Alto consumo de potencia.** Para mitigar las altas pérdidas de propagación, la comunicación radioeléctrica se hará mediante el uso de arrays de antenas con grandes ganancias. El uso de estos arrays formados por muchas antenas, que deben ser alimentadas hace que el consumo de potencia se dispare, lo que implica trabajar con haces muy directivos de ganancia. Además, para mantener la SINR constante debemos aumentar la potencia.
- **Problemas con el hardware.** En general los equipos electrónicos tales como mezcladores, amplificadores, filtros, etc, al trabajar en alta frecuencia, alta potencia y gran ancho de banda tienen problemas de estabilidad, ruido, falta de linealidad, que deben ser solucionados con nuevos diseños de los equipos

## 2.2 Modelos del canal de propagación

En las frecuencias bajas es de sobra conocido el comportamiento del canal de propagación. No ocurre así con el comportamiento del canal de propagación en las frecuencias de las ondas milimétricas. Desde hace más de 10 años, diferentes agencias de investigación internacionales, tales como 5GPPP/METIS, de Estados Unidos y Europa, la agencia de China: China IMT-2020 (5G), Promotion Group, de Korea, como Korea 5G Forum, y Japón, como Japan ARIB, han tratado de predecir las características técnicas que debería cumplir la tecnología 5G para el año 2020.

Los análisis y medidas realizadas por los investigadores van desde los primeros modelos propuestos, hacia el 2003, como el *3GPP Spatial Channel Model (SCM)* que presentaron modelos de canales en frecuencias de 2 GHz, con anchos de banda de canal de 5 MHz en tres escenarios diferentes: urbanos macrocelda, urbano microcelda, suburbano macro celda [10], hasta los modelos de los canales de propagación presentados estos últimos años por los investigadores de NYU WIRELESS, EU mmMAGIC project, 3GPP-Like 5G Model, en los que los modelos presentados van desde los 6 GHz hasta los 100 GHz [45] [46], en una gran variedad de escenarios, desde escenarios dentro de edificios, urbanos macroceldas y urbanos microceldas, en los que se analizan las pérdidas de propagación, las zonas de sombra, etc..

Por tanto, se tiene el objetivo de modelar el canal de propagación, existen diferentes opciones para modelar el canal, las dos opciones de modelado más habituales son los modelos analíticos y los modelos basados en medidas.

### 2.2.1 Modelos del canal de propagación analíticos.

Entre las diferentes empresas u organizaciones que has realizado modelos de canales analíticos podemos resaltar [26]:

- Los modelos presentados por 3GPP y WINNER [47]. Los modelos presentados por ellos son desarrollos de simulaciones a nivel de enlace y a nivel de sistemas capaces de predecir valores reales de comunicación entre la BS y uno o más equipos de usuario. Los dos modelos adoptan la simplificación de considerar cada camino de la onda representada por un frente de onda plano. Aunque difieren en el concepto de definir los diferentes caminos de las ondas. En el modelo 3GPP los diferentes caminos de las ondas se tratan como diferentes retrasos en el tiempo de llegada, y en los modelos WINNER II se trata como caminos difundidos en el espacio.
- Los modelos mmWave Evolution for Backhaul and Access (MIWEBA) [48], caracteriza canales de exterior multicaminos de 60 GHz, trabaja con la superposición de unos pocos rayos fuertes de caminos determinísticos y conjuntos de rayos débiles. El análisis de los rayos fuertes se analiza a partir de las ecuaciones de propagación en espacio libre de Friis a partir de los datos de las alturas y separación de las antenas, y los conjuntos de rayos

aleatorios débiles se modelan a partir de distribuciones estadísticas basadas en medidas.

- El modelo de METIS [49] utiliza una combinación de modelos de canal basados en mapas estocásticos para estimar amplitudes por canal y permite evaluar canales basados en masivos MIMO y algoritmos de conformado de haz de propagación.

### 2.2.2 Modelos del canal de propagación basados en medidas.

Para entender y modelar cómo se comportan los canales de propagación a frecuencias altas, es necesario realizar campañas de medidas donde los principales parámetros a medir han sido:

- Pérdidas de propagación.
- Retardo de propagación debido a las diferencias de caminos.
- Sombras en la propagación debidas a obstáculos.
- Pérdidas de penetración al atravesar obstáculos la señal.

Diferentes empresas y grupos e investigación han realizado medidas en diferentes ambientes de propagación, propagación con visibilidad directa (LOS) y no directa (NLOS), en diferentes frecuencias en la banda de las ondas milimétricas, y midiendo diferentes características de propagación. Al caracterizar estadísticamente los diferentes escenarios exteriores de medida se pueden diferenciar dos tipos de escenarios que varían en el número de reflexiones, la atenuación y el retado. Se han clasificado como escenarios Urbanos y Rurales. Dentro de los escenarios urbanos se ha dividido en dos grupos, macro celdas y micro celdas. También se han caracterizado los escenarios en el interior de los edificios y se denominan “Indoor Hotspot”. Es decir tenemos 4 escenarios principales que se conocen como Urban Macrocell (UMa), Rural Macrocell (RMa), Urban Microcell (UMi), Indoor Hotspot (InH).

Cabe destacar el grupo de investigación NYU WIRELESS, que es un centro de investigación académico de Nueva York, que ha realizado medidas en diferentes ambientes de propagación de las señales en ondas milimétricas y el proyecto europeo EU mmMAGIC Project. Éste es un proyecto financiado por la Comisión Europea del 5G y los principales fabricantes, operadores y universidades e institutos de investigación dedicados a investigar la tecnología 5G. En consecuencia, han realizado multitud de medidas en diferentes anchos de banda en las bandas de frecuencias de 5G. En este proyecto se realizaron medidas desde los 6 GHz hasta los 100 GHz, en diferentes escenarios incluyendo el interior de edificios y escenarios con una gran densidad de usuarios. Además, existen otros grupos que han realizado medidas que se muestran en la tabla número 2.1. Las medidas han sido realizadas en diferentes frecuencias, en la banda de las ondas milimétricas, en los escenarios LOS y NLOS, en diferentes localizaciones, con alturas de antenas diferentes, con ganancias diferentes en las antenas, variando el exponente de atenuación en función

de las pérdidas de propagación, el retardo de dispersión debido a las diferencias de caminos en la propagación de la señal, y la atenuación debida a la sombra.

Freq. (GHz)	Ambiente	Escenario	Sitio	Ref.
11	Macro celular	LoS/NLoS	Ishigaki	[50]
11	Micro celular	LoS	Ishigaki	[50]
11	Outdoor hotspot	LoS	Ishigaki	[50]
26	Dense indoor	LoS	China	[51]
28	Outdoor celular	LoS/NLoS	New York (Manhattan)	[52]
28	Dense urban	LoS/NLoS	New York (Manhattan)	[53]
28	Office	LoS/NLoS	New York (Brooklyn)	[54]
28	Station	LoS/NLoS	Seoul	[55]
28	Airport	LoS/NLoS	Seoul	[55]
28	Urban	NLoS	Daejeon	[56]
28	Urban street	LoS/NLoS	Daejeon	[57]
28	Urban street	LoS/NLoS	New York (Manhattan)	[57]
28	Urban street	LoS/NLoS	New York (Manhattan)	[57]
38	Outdoor Cellular	LoS/NLoS	Austin	[58]
38	Outdoor Cellular	LoS/NLoS	Austin	[58]
38	Outdoor Cellular	LoS/NLoS	Austin	[58]
38	Outdoor Cellular	LoS/NLoS	Austin	[58]
38	Outdoor Cellular	LoS/NLoS	Austin	[58]
38	Outdoor Cellular	LoS/NLoS	Austin	[58]
38	Outdoor Cellular	LoS/NLoS	Austin	[58]
38	Outdoor Cellular	LoS/NLoS	Austin	[58]
55	Urban (street)	LoS/NLoS	London	[59]
60	Hospital	LoS	Japan	[60]
60	Hospital	LoS	Japan	[60]
60	Hospital	LoS	Japan	[60]
60	Street canyon	LoS/NLoS	Berlin	[61]
72	Indoor	NLoS	New York (Brooklyn)	[62]
73	Office	LoS/NLoS	New York (Brooklyn)	[54]
73	Office	LoS/NLoS	New York (Brooklyn)	[54]
73	Office	LoS/NLoS	New York (Brooklyn)	[54]
73	Office	LoS/NLoS	New York (Brooklyn)	[54]
73	Outdoor celular	LoS/NLoS	New York	[63]
73	Dense urban	LoS/NLoS	New York (Manhattan)	[53]
73	Dense urban	LoS/NLoS	New York (Manhattan)	[53]
10	Indoor	LoS/NLoS	Oulu	[64]
11/16/28/38	Indoor	LoS/NLoS	JiNan	[65]

73 26	rural Hall	LoS	Virginia Beijing	
11 16 28 38	indoor office	Los	China	[51]

**Tabla 2-1. Resumen de los resultados de medidas realizadas en ondas milimétricas en diferentes escenarios de propagación, en diferentes localizaciones.**

Además de las anteriores medidas de sistemas en alta frecuencia también se han realizado medidas en sistemas Distribuidos. Por ejemplo, NTT Docomo y Ericsson han realizado medidas a 15 GHz utilizando 2 BS o puntos de transmisión, y un receptor móvil. Los resultados mostraron mejoras en áreas de coberturas grandes y pequeñas, pasando los 10 GBps de velocidad, especialmente cuando los puntos de transmisión se separaban más de 50 metros. Posteriormente realizaron medidas cambiando el ángulo de transmisión entre las antenas transmisoras y con visibilidad directa, y mejoraban aún más los resultados. [66]. Las medidas realizadas por Kurita et al. en su artículo: "Indoor and Outdoor Experiments on 5G Radio Access Using Distributed MIMO and Beamforming in 15 GHz Frequency Band" muestran análisis de sistemas MIMO distribuidos en 15 GHz.

Los investigadores George R. MacCartney, Jr., y Theodore S. Rappaport realizaron medidas en el verano de 2016 en sistemas MIMO distribuidos, de NYU Tandon School of Engineering, New York University, publicadas en su artículo "Millimeter-Wave Base Station Diversity for 5G Coordinated Multipoint (CoMP) Applications", [66] en IEEE, en el que describen como realizaron las medidas en el campus de la Universidad con 11 BS situadas a los largo de diferentes ambientes cercanos a la universidad, y situados unos 4 receptores por cada BS. Usaron antenas de altas ganancias con estrecho haz de radiación, y señales de 1 GHz de ancho de banda en frecuencias de portadora de 73 GHz.

Aún, así, no son muchas las medidas reales realizadas en campo real en sistemas MIMO distribuidos. Por ello es esta tesis, el trabajo de investigación se ha realizado en sistemas MIMO distribuidos masivos a partir de medidas realizadas en una cámara de reverberación y en simulaciones realizados por investigadores de la Universidad de Nueva York.

### 2.3 Simuladores del canal de propagación

Una vez modelado el canal de propagación es necesario estudiar la repercusión o influencia que tiene el canal de comunicaciones en las comunicaciones. Por ello, diferentes grupos de investigación han desarrollado simuladores, que, a partir de las medidas realizadas en diferentes ambientes reales o de modelos analíticos, permiten modelar y predecir cómo se comportará el canal de comunicación en otros ambientes o situaciones.

Algunos de estos simuladores están disponibles para la comunidad científica desde las páginas web de los centros de investigación y permite a los investigadores utilizarlos para contrastar datos.

Algunos de los diferentes grupos de investigación internacionales, que han realizado simuladores, y que están disponibles son:

- Technische Universität Wien [67]. Tiene creado un simulador en 5G, para comunicaciones de redes celulares con fines académicos, que se puede usar registrándose en la web. Es un software que está realizado en Matlab. En realidad, son dos simuladores, uno a nivel de sistemas, y otro a nivel de enlace. Están disponibles desde octubre de 2018. Evalúa el canal en un gran tipo de redes, permitiendo múltiples BS y tipos de usuarios. Permite variar el tamaño y tipos de celdas, el tipo de usuarios, peatón o en vehículo, e incorpora diferentes tipos de propagación, tales, como fading de sombra, diagramas de radiación de antenas, influencias de atenuación de objetos, etc.. También permite elegir el modelo de pérdidas, si el enlace es con visión directa o no, y permite elegir ambientes de propagación urbanos, rurales UMa, UMi, y en el interior de los edificios.
- RemCom [68]. Es un software de simulación electromagnética. Tiene software de simulación de diferentes aplicaciones tales como biomédica, radar de automóviles, de simulación electromagnética de 3D de onda completa analizando el campo electromagnético, y de propagación mediante antenas MIMO de 5G. Este simulador está formado por dos software, InSite inalámbrico y el XFDTD. Entre los dos permite simular el multicamino detallado de un gran número de canales MIMO, y el análisis de los dispositivos en tecnología 5G que permiten trabajar con arrays en alta frecuencia.
- NYUSIM [69] desarrollado por la Universidad de Nueva York (NYU), es un simulador de acceso libre, a través de la página web de la Universidad. Es un simulador que se basa en las medidas reales realizadas por los investigadores de la Universidad, que permite a los usuarios predecir las medidas que se obtendrán en diferentes entornos de propagación. Este simulador está implementado en Matlab, y a partir de su código, los investigadores lo pueden adaptar a sus investigaciones concretas. También se puede utilizar, una vez bajada la aplicación, con un entorno web, en el que se determinan las características de transmisión, y devuelve diferentes parámetros de propagación, como parámetros S, pérdidas de propagación, etc. En general, permite realizar medidas de forma gráfica, desde 0,5 GHz a 100 GHz, con un ancho de banda de canal de hasta 800 MHz, determinando las características de propagación en ambientes tales como lluvia, humedad, separación entre transmisor y receptor, polarización, potencia de transmisión, etc.. también permite determinar las características del array de transmisión y recepción. Este ha sido el simulador utilizado en esta tesis.

Además de los simuladores anteriores, existen diferentes empresas y organismos académicos, tales como universidades, que han desarrollado simuladores basados en el trazado del rayo para comunicaciones inalámbricas, en el que analizan las principales características de propagación. Entre ellas están: [70]

- WinProp [71], soporta simulaciones hasta las frecuencias de 75 GHz. Trabaja en un ancho rango de escenarios de propagación. Es de las pocas simulaciones que soportan objetos móviles dispersos.
- Ranplan professional [72], soporta simulaciones desde 100 MHz a 70 GHz en ambientes en el interior y en el exterior de los edificios.
- EDX advanced Propagation [73], soporta simulaciones desde 30 MHz a 100 GHz. La simulación está principalmente referida a ambientes urbanos. La simulación en espacio libre incluye pérdidas atmosféricas, reflexión en paredes, difracción en esquinas, y dispersión debido a paredes gruesas.
- Volcano [74], simula desde la banda de 6 GHz a 73 GHz, simula características de reflexión, dispersión y difracción.
- Wireless insite [68], simula modelos empíricos desde 50 MHz a 100 GHz.
- Cross wave [75], es un modelo de simulación desarrollado entre Orange Labs y Forks. Está creado para simulaciones desde 200 MHz a 5 GHz, principalmente en tecnologías GSM UMTS y LTE.
- Aster [75], simulador desarrollado por Forks, es parecido a Cross Wave, pero es más avanzado, soporta simulaciones por encima de los 6 GHz.

La tabla número 2.2, a continuación, resume los principales simuladores basados en la trayectoria del rayo [70].

SIMULADOR	FRECUENCIA	MECANISMOS DE PROPAGACIÓN ANALIZADOS
GEMV [76]	Medidas de 5,9 GHz V2V	Análisis de rayo directo, reflejado y difractado.
Cloud RT [77]	450 MHz - 325 GHz	Análisis de transmisión directa, reflejada, dispersa y difracciones.
Win Prop [71]	Hasta 75 GHz	Análisis de transmisión directa, reflejada, dispersa y difracciones.
Ranplan Profesional [72]	100 MHz - 70 GHz	Análisis de transmisión directa, reflejada, dispersa y difracciones.
EDX Avanced Propagation [73]	30 MHz - 100 GHz	Análisis en espacio libre, incluyendo pérdidas atmosféricas, reflexiones en paredes, difracción en esquinas y atenuaciones de vegetación y dispersión en rugosidades.
Volcano [74]	Por debajo de 6 GHz y en bandas de ondas Milimétricas	Análisis de transmisión directa, reflejada y difracciones.
Wireless In Site [68]	50 MHz - 100 GHz	Análisis de transmisión directa, reflejada, dispersa y difracciones, con absorción atmosférica.
Cross Wave [75]	200 MHz - 5 Ghz	Propagación guiada horizontal, difracción vertical y reflexiones en montañas.



Aster [75]	Sobre los 6 GHz y en bandas de ondas milimétricas	Difracción y pérdidas al cruzar vegetación, absorción atmosférica, atenuación de lluvia, difracción y reflexión.
------------	---	--

Tabla 2-2. Tabla de simuladores de rayo directo.

## 2.4 Capacidad del canal de comunicaciones.

Para sistemas con una antena en transmisión y una antena en recepción la capacidad máxima del canal, depende de la fórmula de Shannon, para el caso particular que el canal solo se vea afectado por el ruido blanco Gaussiano, como: [78]

$$C = BW \cdot \log_2(1 + SINR) \quad \text{Ecuación 2-1}$$

Siendo:

$BW$ , ancho de banda disponible para la comunicación,  $SINR$ , relación entre potencia de señal recibida y la potencia de las señales interferentes más el ruido blanco.

Analizando la fórmula, tenemos que los dos factores que limitan la capacidad son el ancho de banda y la relación señal /interferencia y ruido ( $SINR$ ).

Sin embargo, cuando se utilizan múltiples antenas también influye la matriz del canal de propagación (Matriz  $H$ ). A partir de la matriz  $H$  obtenemos la capacidad instantánea de un canal de comunicación para sistemas MIMO [79] [80] [81] que se define como:

$$C_{rxt} = BW * \log_2 \left( \det \left( I_R + \frac{SINR}{t} \times H_{rxt} \times H_{rxt}^H \right) \right) \quad \text{Ecuación 2-2}$$

Donde  $H_{rxt}$  es la matriz de transferencia del canal,  $H_{rxt}^H$  es la matriz conjugada traspuesta de  $H$ . El sistema tiene “ $t$ ” antenas en el transmisor y “ $r$ ” antenas en el receptor, siendo “ $I_R$ ” la matriz identidad de dimensión  $R$ .

Por tanto, el objetivo del modelado y de las medidas del canal de propagación es caracterizar la matriz  $H$  y las pérdidas de propagación (para poder obtener la  $SINR$ ) para poder obtener la capacidad instantánea del canal.

### 2.4.1 Escenarios MIMO medidos

Con un analizador de redes se puede medir la matriz  $H$  midiendo el parámetro  $S_{21}$  entre los diferentes puertos de transmisión y recepción a la vez. Si mantenemos el entorno controlado, por ejemplo, en una cámara anecoica o de reverberación podemos realizar arrays virtuales. Por tanto, en cada conjunto de medidas, la configuración de la cámara debe ser la misma. De esta forma las medidas de los sistemas MIMO se pueden obtener asegurando que el canal de propagación se mantiene constante durante el proceso de medida.

Para esta primera aproximación se realizaron medidas en una Cámara de Reverberación (CR). Para todas las medidas realizadas se usaron dos agitadores, los agitadores son reflectores metálicos que se mueven con la intención de cambiar las condiciones de contorno de la cavidad. Estos dos agitadores cambian uno de ellos 5 veces por medida y el otro 10 veces, de forma que para cada medida se obtienen

50 medidas para cada frecuencia. Se toman 50 medidas, con un ancho de banda de cada medida de 1 MHz, que al realizar 50 medidas tenemos los 50 MHz totales de ancho de banda.

Se crearon 7 escenarios que simulan 7 situaciones reales:

- Escenario A. La CR totalmente vacía, simula un escenario isotrópico. Las señales llegan al receptor desde todas las direcciones posibles.
- Escenario B. Se colocan 24 conos absorbentes en la pared izquierda de la CR, con lo cual se atenúan las señales que provienen de la parte izquierda, y solo llegan señales de la parte derecha.
- Escenario C. Se colocan 24 conos absorbentes en la pared izquierda y derecha, respectivamente, de la CR, se atenúan las señales que provienen de la parte izquierda y derecha y solo llegan señales de la parte central.
- Escenario D. Se introducen en la CR dos cilindros de 2 litros de volumen, rellenos de líquidos de pérdidas, que simulan la cabeza humana.
- Escenario E. Se introducen 4 cilindros de 2 litros de volumen, con líquidos de pérdidas.
- Escenario F. En este escenario, la puerta de la CR está abierta y las antenas se sitúan enfrente y fuera de la CR, con lo que se reducen los parámetros ángulo de llegada ( $AoA$ ), el ángulo de salida ( $AoD$ ) y el retardo de llegada ( $ToA$ ). La potencia que reciben las antenas es menor, ya que están más alejados el receptor y el transmisor. Sería el caso a simular de transmisión libre directo.
- Escenario G. Las antenas se sitúan en un lateral de la CR, y se reducen aún más los parámetros de ángulo de llegada ( $AoA$ ), el ángulo de salida ( $AoD$ ) y el retardo de llegada ( $ToA$ ). También se ve reducida la potencia. Sería el caso a simular de transmisión libre indirecto.

Cada uno de los escenarios simula una BS, diferente con características de propagación diferentes. En total tenemos 7 BS simuladas en la CR. En ellas se han realizado 50 medidas, con diferentes posiciones de los agitadores en 201 frecuencias diferentes, centradas en 1800 MHz. El transmisor está equipado con 3 antenas y el receptor con 12. Las medidas realizadas son los parámetros S de propagación. Entre cada una de las antenas receptoras y transmisoras tenemos 10050 medidas. Para cada una de las antenas receptoras y transmisoras podemos obtener las matrices H de propagación, y combinándolas podemos analizar sistemas SISO, MIMO y MIMO Distribuidos.

Dentro de la Cámara de Reverberación, el parámetro medido es el  $S_{21}$ , que es el mismo que el  $S_{12}$ , ya que las condiciones de propagación en la cámara son las mismas en el enlace ascendente que en descendente. En la simulación de sistemas que se realiza a continuación se tomará como antenas receptoras 3, que se usarán siempre, y como antenas transmisoras 12, que se utilizarán de forma variable según el

sistema que se simule en cada análisis. Las antenas receptoras se consideran en el usuario móvil, y las antenas transmisoras en las BS. Consideramos enlaces descendentes.

2.4.1 Escenarios MIMO Distribuidos medidos

El objetivo es poder analizar sistemas MIMO distribuidos, para ello se utilizan los escenarios anteriores donde la configuración del escenario se ha realizado en la parte del transmisor y la parte del receptor se ha dejado igual en todos los escenarios. De esta manera se podrá emular distintas BS, cada una situada en un entorno de propagación distinto y el receptor en el mismo entorno. Por tanto, las características del canal y las pérdidas de propagación son diferentes para cada nodo. Un ejemplo se presenta en la figura número 2.1.

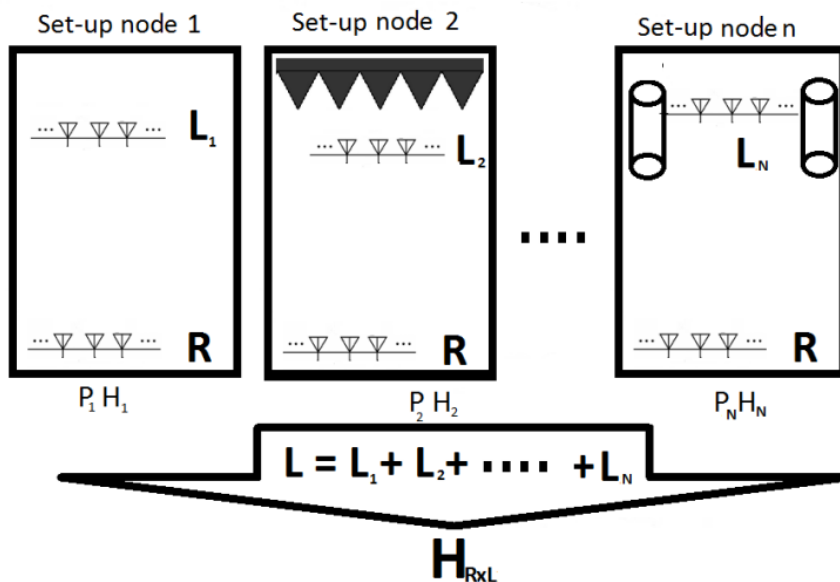


Figura 2-1. Sistema D-MIMO con diferentes configuraciones de propagación en cada nodo.

La idea es que a partir de las medidas realizadas para cada sistema MIMO con unas condiciones de propagación concretas, cambiando las condiciones de propagación y combinando los valores obtenidos se puede medir un sistema D-MIMO. En cada condición de propagación, se tendrán un número de antenas transmisoras y receptoras, y cada una de las condiciones de propagación simularán una estación Base Transmisora, situada cada una en una localización diferente, que emite a un receptor situado siempre en el mismo sitio, que es el equipo de usuarios.

Dentro de la cámara de reverberación, en todos los casos el receptor será el mismo, y solo cambio las condiciones de propagación y el número de antenas del transmisor, de forma que simula un transmisor situado en cada caso en una localización diferente. Una vez combinados todos estos sistemas MIMO independientes tengo los resultados de un sistema distribuido MIMO.

El proceso se describe a continuación:

- Se obtiene la matriz de medidas realizadas en el nodo 1. La matriz es  $H_1$ . Como tenemos  $L_1$  antenas de transmisión, y  $R$  antenas de recepción, la matriz será de dimensiones  $R \times L_1$ . Las medidas realizadas son los parámetros  $S$ , que representan las condiciones de propagación multicamino entre las antenas transmisoras y receptoras dentro de la cámara de reverberación. Para cada matriz de medidas, se calcula la capacidad del canal para un rango específico de SINR usando la matriz normalizada de Frobenius de coeficientes del canal:

$$\|H\|_F = \sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=01}^n |h_{i,j}|^2} \quad \text{Ecuación 2-3}$$

Donde  $h_{i,j}$  es la muestra instantánea medida entre la antena  $i$  y la antena  $j$ . Una descripción detallada del procedimiento de medida está en [80] y [81].

- En el nodo 2, se cambia la configuración añadiendo absorbentes. Existen  $L_2$  antenas transmisoras y  $R$  antenas receptoras. La nueva matriz  $H_2$  tiene dimensiones  $R \times L_2$ . Este nodo simula una propagación con pérdidas.
- Se realizan tantas configuraciones de propagación como se necesiten, y se obtienen las matrices  $H_N$ .
- Se combinan todas la matrices para obtener una matriz  $H$  de dimensión  $R \times (L_1 + L_2 + \dots + L_n)$ , es decir,  $H = [H_1, H_2, \dots, H_N]$
- Se normaliza la matriz  $H$  aplicando la normalización de Frobenius
- Con la matriz  $H$  normalizada se pueden extraer parámetros como la capacidad, la ganancia de diversidad y la correlación de igual manera que se obtiene para sistemas MIMO.

Es importante resaltar que en cada caso en que se obtiene la matriz  $H_N$ , la potencia recibida en el receptor es diferente, ya que las condiciones de propagación son diferentes, y en consecuencia las pérdidas de propagación.

## 2.5 Análisis inicial de sistemas MIMO y MIMO Distribuidos.

En un primer análisis se realizan 5 estudios diferentes partiendo de unas medidas realizadas en una cámara de reverberación en la que el receptor tiene 3 antenas, y el transmisor está compuesto por 12 antenas. Las 3 antenas del receptor se utilizarán siempre, y en el análisis se usarán las antenas que se necesiten de las 12 antenas del transmisor. Para cada una de las antenas transmisoras se realiza la medida de los parámetros  $S$ , en la transmisión de señal a cada una de las antenas receptoras. Esta medida se realiza en 50 posiciones diferentes y en 50 frecuencias diferentes. La frecuencia a las que se toman las medidas están centradas en 1800 MHz, con un ancho de banda de 50 MHz, en total, que son 1 MHz por canal. En total se realizan 10050 medidas diferentes de cada antena transmisora a cada antena receptora.

De los 7 escenarios descritos en el apartado anterior, para estas medidas solo se utilizan 3 escenarios el A, el B y el E.

Los diferentes escenarios de la cámara producen diferentes condiciones de propagación. Así, en el primer caso las pérdidas de propagación son menores que en los casos 2 y 3. No obstante, en este análisis solamente se evalúa la capacidad de cada caso.

Para cada conjunto de medidas realizadas se combinan los resultados obtenidos y se calcula la capacidad para 36 SINR diferentes. Los valores de SINR están equiespaciados en intervalos de 1 dB.

A partir de estas medidas, combinando diferentes antenas transmisoras y diferentes condiciones de propagación, se obtiene la matriz H, para un conjunto de valores de SINR. Con esto valores, y usando la ecuación (1), se obtiene las capacidades en  $\frac{Bits/sg}{Hz}$  para un sistema de transmisión concreto. Comparando la capacidad de diferentes sistemas de transmisión, se puede evaluar las mejoras o beneficios de utilizar un sistema u otro.

### 2.5.1 Nomenclatura.

En los análisis realizados, y presentados en este documento, se trabaja con matrices obtenidas a través de medidas realizadas en cámaras de reverberación y simuladas a través de simuladores de señales en diferentes escenarios. Para poder referirnos a cada uno de ellos de una forma clara y esquemática se crea un sistema de nomenclatura que se utiliza en el resto del documento. Se presenta en las siguientes tablas:

ÍNDICE DE NOMENCLATURAS			
Tipos de matriz:		Tipos de sistemas a analizar:	
HT	Matriz teórica.	SS	Sistema SIMO
HM	Matriz obtenida a través de medida	SM	Sistema MIMO
HS	Matriz obtenida por simuladores.	SDM	Sistema DMIMO
PV	Análisis en potencia variable (Caso de que sea este tipo de análisis) a,b,c,... Antenas elegidas en recepción números a,b,c		
LETRA (A-G)	7 escenarios de medidas en la Cámara de reverberación.		

**Tabla 2-3. Nomenclatura. Índice.**

Ejemplo de nomenclatura:

HM-SM-A-TRxRX\_a,b,c,d,..: Matriz medida, sistema MIMO, escenario A, n° antenas Tr x n° antenas receptoras

- **Sistemas TEORICO**

HT	Matriz teórica.
SM	Sistemas MIMO
SDM	Sistemas DMIMO

n° BS	n° de BS utilizadas
NTX	Número de antenas transmisoras totales
NRX	Número de antenas receptoras totales

**Tabla 2-4. Nomenclatura. Sistema Teórico.**

Ejemplo de nomenclatura:

HT-SM-NTX-NRX

Matriz teórica, sistema MIMO, n° antenas NTX x n° antenas receptoras

- **Sistemas MIMO (Implica un único escenario de Medida)**

HM	Matriz obtenida a través de medida.
SM	Sistemas MIMO
PV	Análisis en potencia variable (Caso de que sea este tipo de análisis)
A-G	Escenario de medida
NTX	Número de antenas transmisoras totales
NRX	Número de antenas receptoras totales
a,b,c,	Antenas elegidas en recepción números a,b,c
A1	Número de medida

**Tabla 2-5. Nomenclatura. Sistema MIMO.**

Ejemplo de nomenclatura:

HM-SM- PV -A-NTXxNRX-a,b,c,d-A1

Matriz medida, sistema MIMO, escenario de medida A, n° antenas NTX x n° antenas receptoras NRX, antenas elegidas: a,b,c,d, Medida realizada A1.

- **Sistemas DMIMO (varias BS de medida)**

HM	Matriz obtenida a través de medida.
SDM	Sistemas DMIMO
n° BS	n° de BS utilizadas
PV	Análisis en potencia variable (Caso de que sea este tipo de análisis)
A-G	Escenarios de medida
NTX	Número de antenas transmisoras totales
NRX	Número de antenas receptoras totales
A1	Número de medida

**Tabla 2-6. Nomenclatura. Sistema DMIMO.**

Ejemplo de nomenclatura:

HM-SDM- PV-n° BS-A-NTXxNRX-a,b,c,d-A1

Matriz medida, sistema DMIMO, n° de BS elegidas, escenario de medida A, n° antenas NTX x n° antenas receptoras NRX, antenas elegidas: a,b,c,d, Medida realizada A1.

### 2.5.2 Comparación sistemas SIMO, MIMO y DMIMO.

En este primer estudio se analiza el comportamiento de 3 sistemas diferentes, SIMO, MIMO y DMMO, con características en cuanto al número de antenas parecidas. Para ello se calcula la capacidad de los tres sistemas en diferentes entornos medidos.

Se constituyen 3 configuraciones diferentes a comparar el valor de la capacidad en cada una de ellas. El valor medido en la CR es el valor del parámetro  $S_{21}$  de todos los valores medidos, y a partir de este valor, se obtiene la matriz H de propagación y a partir de ésta matriz, se calcula la capacidad de cada una de las configuraciones estudiadas.

- Se crea una configuración formada por un transmisor que tiene con una sola antena transmisora y 3 antenas receptoras. La antena transmisora utilizada es la número 1, recordar que tenemos 12 posibles antenas transmisoras en cada transmisor. La configuración se repite para para las 3 situaciones definidas anteriormente de la CR. La antena transmisora número 1 transmite a las antenas receptoras, en el escenario de cámara vacía, escenario A, para las situaciones de cámara con absorbentes, escenario B y de cámara con garrafas de absorción, escenario E. HM-SS-A,B,E\_1X3\_1. Tengo 3 medidas independientes, una para cada situación de la CR. Es un sistema SIMO, tengo 1 antena transmisora y 3 antenas receptoras. Estudio el caso de propagación de un equipamiento de usuario conectado a una BS en diferentes condiciones de propagación, y cálculo para cada caso la capacidad para compararla. Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema SISO, SS. 1 antena transmisora x 3 antenas receptoras. Se elige la antena 1. Esquemáticamente se representa como: HM-SS-1X3\_1
- En este caso se estudia la propagación en un sistema MIMO. Se Constituye una configuración para el caso de 3 antenas transmisoras y 3 antenas receptoras, se elige las antenas número 1, 3 y 5 en el transmisor, y solo se trabaja en el escenario de C.R vacía. Se obtiene una medida de la capacidad. Sistema MIMO. Caso de un equipamiento de usuario conectado a una BS que tiene 3 antenas receptoras. Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema MIMO, SM. Se trabaja en el escenario A. 3 antenas transmisoras x 3 antenas receptoras. Se elige las antenas 1, 3 y 5. Esquemáticamente se representa como: HM-SM-A-3X3\_1,3,5
- En este caso se estudia la propagación en un sistema Distribuido D\_MIMO. La configuración para el caso de 1 antena transmisora la número 1, y las 3 antenas receptoras, en los tres escenarios de la C.R. en total tenemos 3 antenas transmisoras y 3 antenas receptoras, solo que cada una de las trasmisoras de un escenario diferente, que equivale a una BS diferente con condiciones de propagación diferente. Tenemos una medida de la capacidad. Es un sistema D-MIMO. Caso de un equipamiento de usuario conectado a 3 BS, diferentes, cada una de ellas con 1 antena receptora. Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Se trabaja en los escenarios A, B y E. 3 antena transmisora x 3 antenas receptoras. Se elige la antena 1. Esquemáticamente se representa como: HM-SDM-3BS-A,B,E-3X3\_1

Se calcula la capacidad para los 3 primeros casos del análisis 1 como 3 casos diferentes, y para los análisis 2 y 3.

La capacidad se representa para diferentes valores de SINR en todos los casos. Se representa en la figura 2.2.

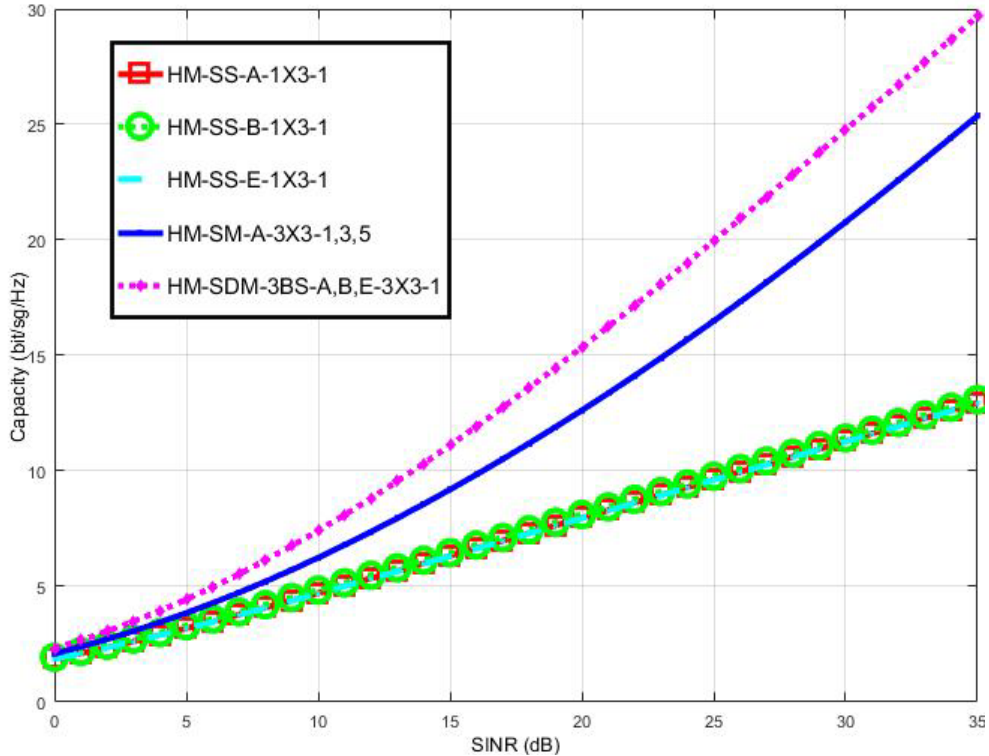


Figura 2-2. Comparación sistemas SIMO, MIMO y DMIMO.

Se observa como la capacidad del caso SDM es mucho mayor que el resto de los casos, y le sigue el caso SM, teniendo el mismo número de antenas. Lo cual concuerda con lo esperado, que los sistemas DMIMO obtienen mayor capacidad que los sistemas MIMO, y éstos que los sistemas SIMO.

Las líneas rojas, verdes y cian corresponden a los escenarios 1, 2 y 3, que son los sistemas SIMO en las configuraciones de propagación Isotrópica, con absorbentes y con garrafas. Están situadas una encima de la otra, ya que tiene la misma capacidad. En las tres configuraciones la capacidad es la misma, aunque las condiciones de propagación sean diferentes, ya que las condiciones de propagación solo afectan a las pérdidas de propagación, que serán diferentes.

La línea azul, corresponde al sistema MIMO. Se observa en la figura 2.2, como al utilizar 3 antenas en recepción mejora claramente la capacidad del sistema con respecto al sistema MISO anterior, que usa una sola antena en recepción.

La línea rosa, corresponde al sistema D-MIMO. Se observa cómo, aunque el número de antenas receptoras es el mismo que en la configuración 1B, al estar estas antenas situadas en puntos diferentes, es un sistema distribuido, la capacidad del sistema mejora de una forma notable.



Con esta configuración se ve claro que los sistemas MIMO obtienen una capacidad mayor que los sistemas SIMO, y los sistemas D\_MIMO tienen una capacidad mayor aún.

### 2.5.3 Comparación sistemas Teórico y DMIMO

Se analiza la capacidad para tres sistemas, uno el mejor, sistema teórico, y otros dos sistemas DMIMO, los dos formados por 3BS, pero uno con 3 antenas en cada BS y otro con solo dos antenas en cada BS.

Se constituyen 3 situaciones diferentes a comparar en las que tomo el valor del parámetro  $S_{21}$  de todos los valores medidos.

Se comparan dos sistemas DMIMO, uno formado por 3 BS y otro formado por 2 BS, los dos con 3 antenas en cada BS, y los dos se comparan con el caso teórico de un sistema DMIMO con 3 BS con 3 antenas en cada BS. La idea es comprobar cuanto varía la capacidad de los sistemas DMIMO en función del número de antenas en cada BS.

- Se obtiene un sistema MIMO teórico de propagación, formado por 9 antenas transmisoras y 3 antenas receptoras. Es el caso mejor, que debe proporcionar los mejores valores de capacidad de transmisión. Se analiza un sistema obtenido a través de matriz teórica, HT. 9 antena transmisora x 3 antenas receptoras. Esquemáticamente se representa como: HT-9x3
- Se obtiene un sistema formado por 3 antenas trasmisoras en cada una de las BS y 3 antenas receptoras. Para cada uno de los 3 escenarios, en cada transmisor se usan las antenas receptoras 1, 3 y 5. Es un sistema D-MIMO con 9 antenas trasmisoras en total, 3 de ellas en cada BS definidas por cada uno de los escenarios. Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Formado por 3 BS. Se trabaja en los escenarios A, B y E. 9 antena transmisora x 3 antenas receptoras. Se elige las antenas 1, 3 y 5. Esquemáticamente se representa como: HM-SDM-3BS-A,B,E-9X3\_1,3,5
- Se obtiene un sistema formado por 3 antenas trasmisoras en cada una de las 3 BS y 2 antenas receptoras. Para cada uno de los 3 escenarios, en cada transmisor se usan las antenas trasmisoras 1 y 3. Es un sistema D-MIMO con 6 antenas trasmisoras en total, 3 de ellas en cada BS definidas por cada uno de los escenarios. Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Formado por 2 BS. Se trabaja en los escenarios A, B y E. 6 antena transmisora x 3 antenas receptoras. Se elige las antenas 1 y 3. Esquemáticamente se representa como: HM-SDM-2BS-A,B,E-6X3\_1,3

El resultado de la capacidad se presenta en la figura 2.3. La línea roja corresponde, a la configuración del sistema teórico, que presenta la mejor capacidad de propagación disponible. La línea verde, presenta la capacidad de un sistema D-MIMO con 3 BS, cada una con 3 antenas trasmisoras. Se obtiene unos valores de

capacidad muy próximos a los valores teóricos. La línea azul, presenta la capacidad de un sistema D-MIMO con 3 BS cada una con 2 antenas trasmisoras.

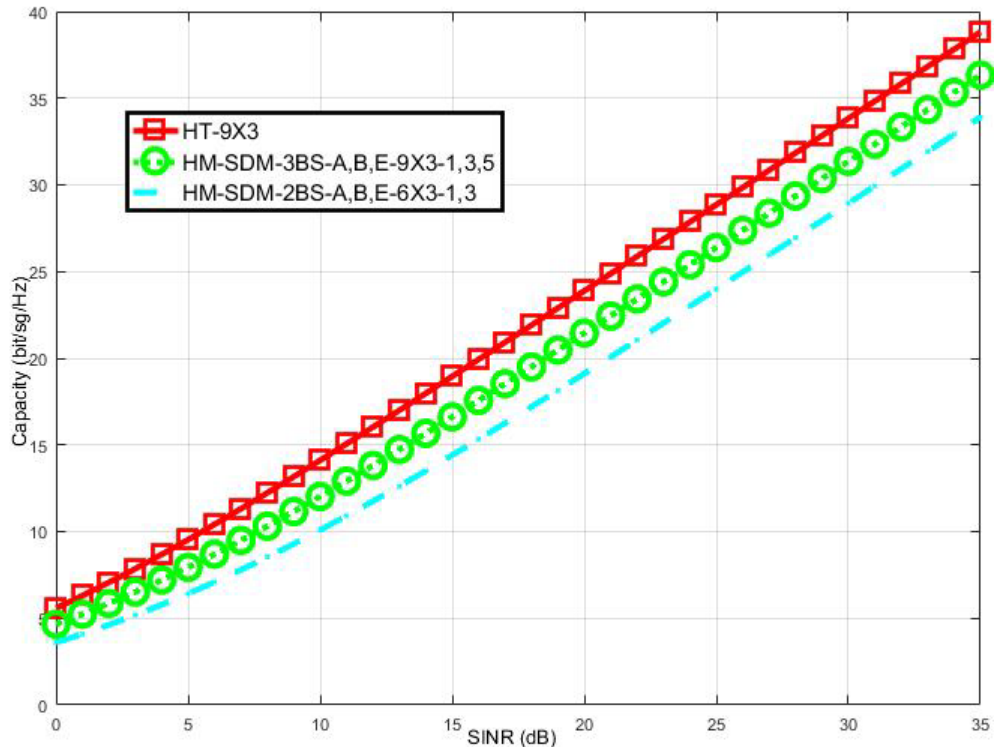


Figura 2-3. Comparación sistemas Teórico y DMIMO

Se observa como los sistemas D-MIMO tienen unos valores de capacidad próximos a los valores óptimos. Aunque el último caso tiene unos valores de capacidad inferiores a los anteriores, no por ello sería el caso peor, o menos interesante, ya que solo se compone de 2 antenas trasmisoras en cada BS y en consecuencia se reduce mucho la complejidad de conexión y sincronización de los sistemas, a costa de perder un poco en la capacidad del sistema.

#### 2.5.4 Análisis de sistemas MIMO en función del grado de correlación.

En este análisis se estudia cómo influye el grado de correlación de las antenas en una misma BS. El análisis se realiza en un sistema MIMO. Se analiza cómo influye este parámetro en la capacidad del sistema de transmisión.

Se constituyen 3 configuraciones eligiendo diferentes antenas en cada array. El escenario que se utiliza en este cálculo, es el de cámara vacía, escenario A, en los tres casos. Se constituyen 3 sistemas formado por las 3 antenas trasmisoras en una misma BS y 3 antenas receptoras.

Se comparan 3 sistemas MIMO, en los que se varía el número de antenas elegidas, de forma que los sistemas con las antenas más juntas son más correlados, y los sistemas con las antenas más separadas, dentro de las 12 posibles, son menos correlados, para ver cómo influye este parámetro en la capacidad total e cada sistema.

- Se constituye un sistema formado por las 3 antenas transmisoras 1,3 y 5 y las 3 antenas receptoras. Las 3 antenas están un poco separadas. Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema MIMO, SM. Se trabaja en el escenario A. 3 antena transmisora x 3 antenas receptoras. Se elige las antenas 1, 3 y 5. Esquemáticamente se representa como: HM-SM-A-3X3-1,3,5
- Se constituye un sistema formado por las 3 antenas transmisoras 1,2 y 3, las antenas juntas y las 3 antenas receptoras. Se espera que sean los más correlados. Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema MIMO, SM. Se trabaja en el escenario A. 3 antena transmisora x 3 antenas receptoras. Se elige las antenas 1, 2 y 3. Esquemáticamente se representa como: HM-SM-A-3X3-1,2,3
- Se constituye un sistema formado por las 3 antenas transmisoras 1,6 y 12 y las 3 antenas receptoras. Las antenas lo más separadas posibles. Se espera que tenga la correlación más baja. Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema MIMO, SM. Se trabaja en el escenario A. 3 antena transmisora x 3 antenas receptoras. Se elige las antenas 1, 6 y 12. Esquemáticamente se representa como: HM-SM-A-3X3-1,6,12

El resultado se observa en la figura 2.4.

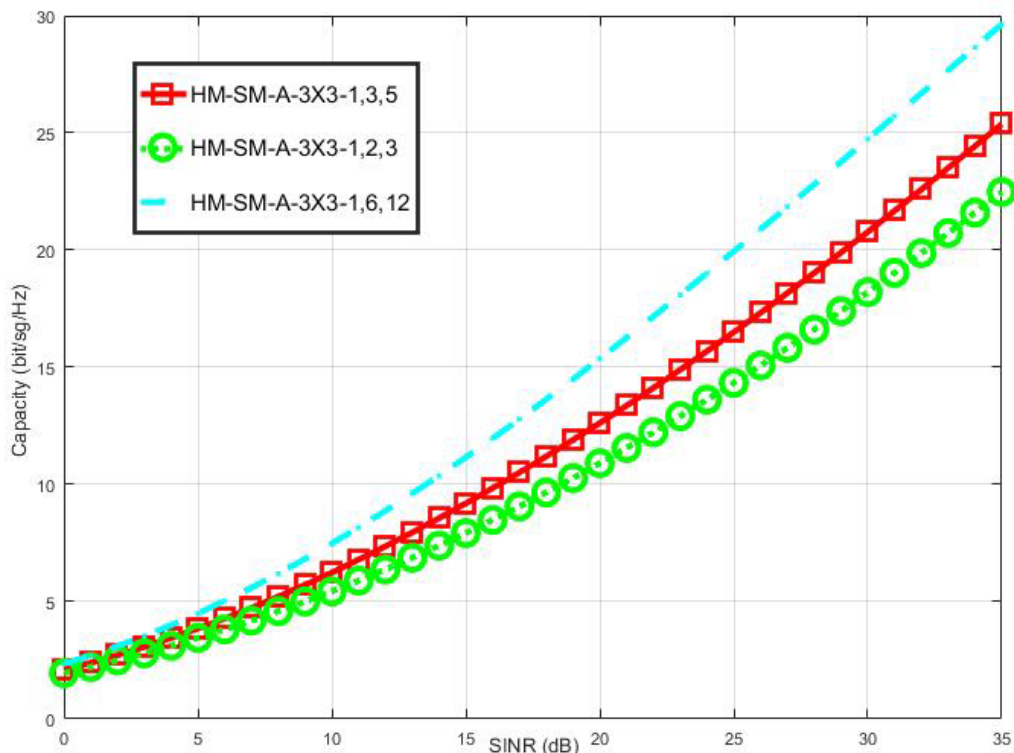


Figura 2-4. Análisis de sistemas MIMO en función del grado de correlación.

La figura 2.4, presenta mejora de capacidad de propagación cuanto más incorreladas, o separadas están las antenas receptoras. Esto es lógico, cuanto más

separación exista entre las antenas trasmisoras más simula la propagación multicamino, y mejora la capacidad de transmisión. Cuanto más separadas estén las antenas trasmisoras más nos acercamos a un sistema D-MIMO.

### 2.5.5 Análisis de sistemas DMIMO en función del grado de correlación.

Se analiza cómo influye la correlación en un sistema DMIMO.

Para ello se toma el mismo número de antenas de cada uno de los 3 escenarios, pero situadas en diferentes posiciones. Se calcula la capacidad en cada caso como medida de valoración de los sistemas.

Se forman 3 configuraciones diferentes eligiendo diferentes antenas receptoras en cada array. Los escenarios que se usan en este cálculo, es el de cámara vacía, escenario A, propagación isotrópica escenario B y de cámara con garrafas de absorción, escenario E, en las tres situaciones. Se forman 3 sistemas DMIMO con 6 antenas trasmisoras y 3 antenas receptoras. Las antenas trasmisoras son 2 de cada escenario, que simulan 3 BS.

Comparo cómo influye el parámetro de la correlación en la capacidad total del sistema.

- Se constituye un sistema D-MIMO formado por un transmisor con las antenas 1 y 3 en cada una de las 3 BS, situadas cada BS en cada una de las 3 situaciones de propagación y las 3 antenas receptoras. Las antenas un poco separadas entre sí. Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Formado por 3 BS. Se trabaja en los escenarios A, B y E. 6 antena transmisora x 3 antenas receptoras. Se elige las antenas 1 y 3. Esquemáticamente se representa como: HM-SDM-3BS-A,B,E-6X3-1,3
- Se constituye un sistema D-MIMO formado por un transmisor con las antenas 1 y 12 en cada una de las 3 BS, situadas cada BS en cada una de las 3 situaciones de propagación y las 3 antenas receptoras. Las antenas un poco separadas entre sí. Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Formado por 3 BS. Se trabaja en los escenarios A, B y E. 6 antena transmisora x 3 antenas receptoras. Se elige las antenas 1 y 12. Esquemáticamente se representa como: HM-SDM-3BS-A,B,E-6X3-1,12.
- Se constituye un sistema D-MIMO formado por un transmisor con las antenas 1 y 2 en cada una de las 3 BS, situadas cada BS en cada una de las 3 situaciones de propagación y las 3 antenas receptoras. Las antenas un poco separadas entre sí. Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Formado por 3 BS. Se trabaja en los escenarios A, B y E. 6 antena transmisora x 3 antenas receptoras. Se elige las antenas 1 y 2. Esquemáticamente se representa como: HM-SDM-3BS-A,B,E-6X3-1,2

Los resultados son los de la figura 2.5.

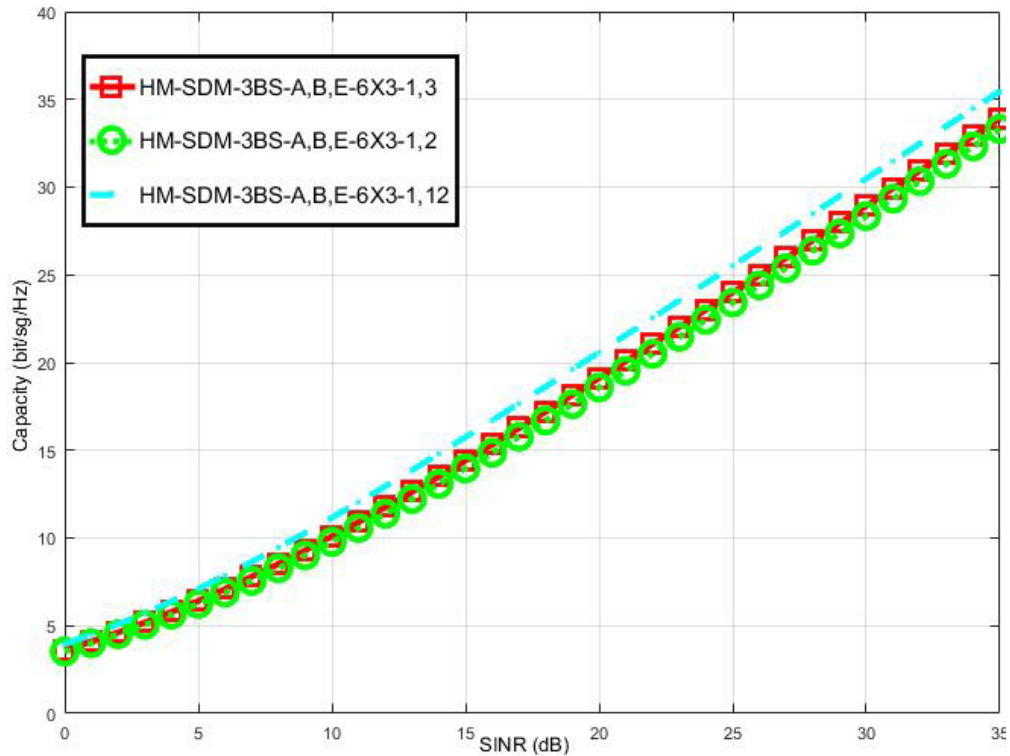


Figura 2-5. Análisis de sistemas DMIMO en función del grado de correlación.

Como era de esperar también en los sistemas D-MIMO mejora la capacidad al aumentar el grado de decorrelación de las antenas. No obstante, como se trata de sistemas D-MIMO, afecta menos que en los sistemas MIMO, ya que partimos de BS que están separadas físicamente, y en consecuencia las antenas están separadas. Comparando las figuras 2.4 y la 2.5, se observa como en el caso de sistemas D-MIMO se obtienen mejores valores de capacidad para los mismos valores de SINR.

#### 2.5.6 Análisis de sistemas teórico y mejor DMIMO.

Se compara el sistema mejor de todas las medidas realizadas, es decir se utilizan todas las antenas receptoras, las 12 antenas receptoras en los tres escenarios o BS, cada una con sus condiciones diferentes de propagación. Cámara vacía, cámara con absorbentes y cámara con garrafas. Se compara con el sistema teórico, el mejor caso de capacidad, formado por un receptor de 12 antenas.

- Sistema formado por 12 antenas transmisoras en 3 BS diferentes y 3 antenas receptoras, cada BS en una de las tres condiciones de propagación descritas. Se trata de un sistema formado por 36 antenas transmisoras y 3 antenas receptoras, 12 antenas receptoras en cada una de las 3 BS. Es un sistema DMIMO con 3 antenas transmisoras y 36 antenas receptoras, 36x3. Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Formado por 3 BS. Se trabaja en los escenarios A, B y E. 36

antena transmisora x 3 antenas receptoras. Esquemáticamente se representa como: HM-SDM-3BS-A, B, E-36X3.

- Sistema teórico, formado por 12 antenas transmisoras y 3 antenas receptoras. Caso mejor. Es un sistema 12x3. Se analiza un sistema obtenido a través de matriz teórica, HT. 12 antena transmisora x 3 antenas receptoras. Esquemáticamente se representa como: HT-12X3.

El resultado de capacidad lo vemos en la figura número 2.6.

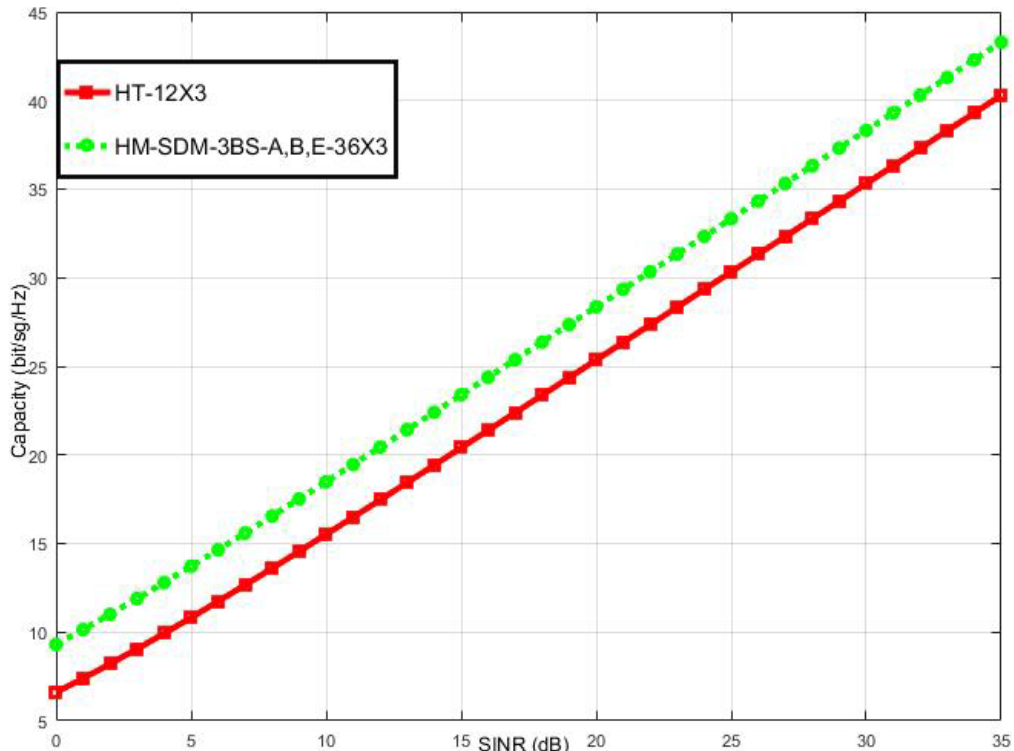


Figura 2-6. Análisis de sistemas teórico y mejor DMIMO.

El resultado de capacidad de un sistema DMIMO formado por 3 BS con 36 antenas en total tiene una capacidad incluso mayor que el sistema teórico de un sistema MIMO con 12 antenas en la BS.

No obstante, este resultado es solo teórico, ya que la complejidad de instalar 3 BS. con 12 antenas transmisoras en cada una, complica mucho el sistema, y lo encarece. No obstante, algunas de las últimas investigaciones están estudiando los beneficios, en términos de transmisión de señales, de usar muchas antenas en las BS. Esta tecnología se conoce como MIMO masivo.

## 2.6 Conclusiones

En este capítulo se introduce el canal de propagación y la influencia que tiene a la hora de calcular la capacidad del enlace de comunicaciones. Se analiza los diferentes modelos que existen del canal de propagación, así como los diferentes simuladores

que existen del canal de propagación. Se detallan algunos de los principales grupos de investigación en el campo de las medidas y simulaciones del canal de propagación.

A continuación, se describe el método utilizado para obtener las matrices del canal de propagación partiendo de las medidas realizadas en una cámara de reverberación. Se describen las diferentes configuraciones realizadas. Seguidamente se describe el método para combinar diferentes configuraciones y obtener sistemas MIMO Distribuidos. Para finalizar este capítulo se realiza un primer análisis de diferentes sistemas SIMO, MIMO y DMIMO, de los que se ha calculado la capacidad que se obtiene en cada sistema, en función del número de BS elegidas en los sistemas DMIMO, y el número de antenas elegidas en cada sistema. Así mismo, se ha comparado también la capacidad obtenida en cada caso en función del grado de correlación de cada caso. Como primera conclusión importante se puede extraer que los sistemas MIMO degradan más su capacidad que los sistemas DMIMO en función de la correlación. Esto ocurre por el grado de decorrelación implícito en los sistemas DMIMO al tener varias estaciones base.

## 3. SISTEMAS MIMO DISTRIBUIDOS MASIVOS.

### 3.1 Introducción.

Basándose en el análisis preliminar hecho en el capítulo anterior se combinan los distintos escenarios para obtener comparación de sistemas con un alto número de antenas en transmisión, lo que se puede considerar sistemas MIMO Masivos. Para poder alcanzar un número alto de antenas es necesario combinar varios escenarios, por tanto, se realizarán simulaciones de sistemas MIMO Distribuidos Masivos. En este capítulo se ha realizado un análisis variable de número y tipo de BS, y de número de antenas. De las 84 Antenas disponibles entre todas las BS (7 BS x 12 antenas) se busca la combinación de antenas y estaciones base (BS) que mayor capacidad produzcan. El receptor siempre tendrá 3 antenas decorreladas. Así en este capítulo se realizan 5 análisis en función del número de antenas transmisoras. Se analizan los sistemas para 5, 7, 10, 20 y 40 antenas transmisoras. También se obtiene la capacidad para un sistema teórico, en el que los valores de la capacidad se obtienen a partir de los valores de la matriz H simulada, y que lógicamente es el caso mejor, y que sirven para tener una referencia de la capacidad con respecto a los sistemas medidos.

El objetivo del estudio es demostrar que cuando el número de antenas es alto, es decir, cuanto más nos acercamos a tecnología de MIMO masivo, da lo mismo coger unas antenas que otras, que la capacidad obtenida es muy parecida. Sin embargo, cuando el número de antenas sea bajo tiene mucha influencia en la capacidad obtenida las antenas que se escojan. Es decir, que los sistemas sean más o menos correlados deja de tener influencia en los sistemas MIMO masivos.

En cada medida se calcula la capacidad con diferentes antenas elegidas en diferentes BS elegidas y se calcula la correlación entre las antenas y entre las BS. Se analiza la relación entre los resultados obtenidos con los valores de las antenas y BS elegidos. También se tiene como objetivo del estudio obtener alguna relación que indique si es interesante utilizar muchas antenas o muchas BS a la vez en cada transmisión. En otras palabras, que es más interesante tener más antenas en las estaciones base o tener más estaciones base. Está claro que cuantas más estaciones base tengamos se habrán de imponer unos requerimientos más estrictos a las redes troncales en cuanto a tiempos de latencia y velocidad de comunicaciones para poder coordinar la transmisión.



### 3.2 Sistema D-MIMO 5x3

Se analiza un sistema DMIMO formado por 5 antenas transmisoras y 3 antenas receptoras. Las antenas transmisoras se distribuyen en diferentes BS, dependiendo del sistema que se analiza. Para cada sistema que se analiza se obtiene la capacidad para valores de SINR espaciados 5dB de 0 a 35 dB. Así mismo para cada sistema analizado se obtiene el grado de correlación, para estudiar si existe relación entre la capacidad de cada sistema y el grado de correlación obtenido según la BS elegida y las antenas de cada BS.

Las antenas receptoras serán siempre 3, que son las situadas en el equipo de usuario. Las antenas transmisoras, situadas en las BS, son las que se varían en cada análisis. Los análisis que se realizan son distribuyendo las antenas transmisoras en 5 BS, en 3 BS, en 2 BS y en una BS. En el primer caso de distribuir las antenas transmisoras en 5 BS, se realiza el análisis 2 veces, identificadas con caso "a" y caso "b". En el caso "a" se eligen las BS casi secuencialmente, y en el segundo caso "b" se eligen las BS separadas, para que los sistemas sean menos correlados, con la intención de estudiar cómo afecta la correlación de los sistemas a la capacidad. En los siguientes análisis se reparten las antenas transmisoras en 3, 2 y 1 BS para estudiar cómo varía la correlación y la capacidad al reducir el número de BS de los sistemas DMIMO. En cada uno de los análisis, se varía las antenas elegidas en cada BS, y se varía las BS elegidas, dentro de los posibles 7 escenarios, que se han presentado anteriormente.

#### 3.2.1 Sistema formado por 5 BS. Caso a.

Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Formado por 5 BS. 5 antena transmisora x 3 antenas receptoras. Caso a. Esquemáticamente se representa como: HM-SDM-5BS-5X3-a

Se toman 5 antenas y 5 BS, se elige: 1 antena transmisora en cada BS.

Se eligen 5 BS aleatoriamente de las 7 posibles, y de cada BS se elige una antena. Repito el análisis 3 veces, modificando las BS elegidas, y el número de la antena elegida de cada BS.

Primer análisis, A1. En el primer análisis elijo las 5 primeras BS, y la antena número 1 de cada BS. Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Formado por 5 BS. Se trabaja en los escenarios A, B, C, D y E. 5 antena transmisora x 3 antenas receptoras. Se elige la antena 1. Análisis A1. Esquemáticamente se representa como: HM-SDM-5BS-A,B,C,D,E-5X3-1-A1

Segundo análisis, A2. En el segundo análisis elijo las mismas BS, pero elijo las antenas números 1 y 6 secuencialmente, de cada BS. Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Formado por 5 BS. Se trabaja en los escenarios A, B, C, D y E. 5 antena transmisora x 3 antenas receptoras. Se elige las antenas 1 y 6. Análisis A2. Esquemáticamente se representa como: HM-SDM-5BS-A,B,C,D,E-5X3-1,6-A2

Tercer análisis, A3. En el tercer análisis elijo las 5 últimas BS y las antenas números 1 y 12 secuencialmente de cada BS. Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Formado por 5 BS. Se trabaja en los escenarios C, D, E F y G. 5 antena transmisora x 3 antenas receptoras. Se elige las antenas 1 y 12. Análisis A3. Esquemáticamente se representa como HM-SDM-5BS-C,D,E,F,G-5X3-1,12-A3

Se mide la capacidad y la correlación en cada caso, para analizar la relación de la capacidad del sistema con la correlación.

La tabla 3.1 presenta las BS elegidas y las antenas de cada BS.

SISTEMA	ANTENAS TRASMISORAS					Correlación media
HT-SDM-5BS-5X3						
HM-SDM-5BS-A,B,C,D,E-5X3-1-A1	1	1	1	1	1	0,3148
	BS1	BS2	BS3	BS4	BS5	
HM-SDM-5BS-A,B,C,D,E-5X3-1,6-A2	1	6	1	6	1	0,271
	BS1	BS2	BS3	BS4	BS5	
HM-SDM-5BS-C,D,E,F,G-5X3-1,12-A3	1	12	1	12	1	0,4674
	BS3	BS4	BS5	BS6	BS7	

Tabla 3-1. Antenas elegidas. HM-SDM-5BS-5X3-a

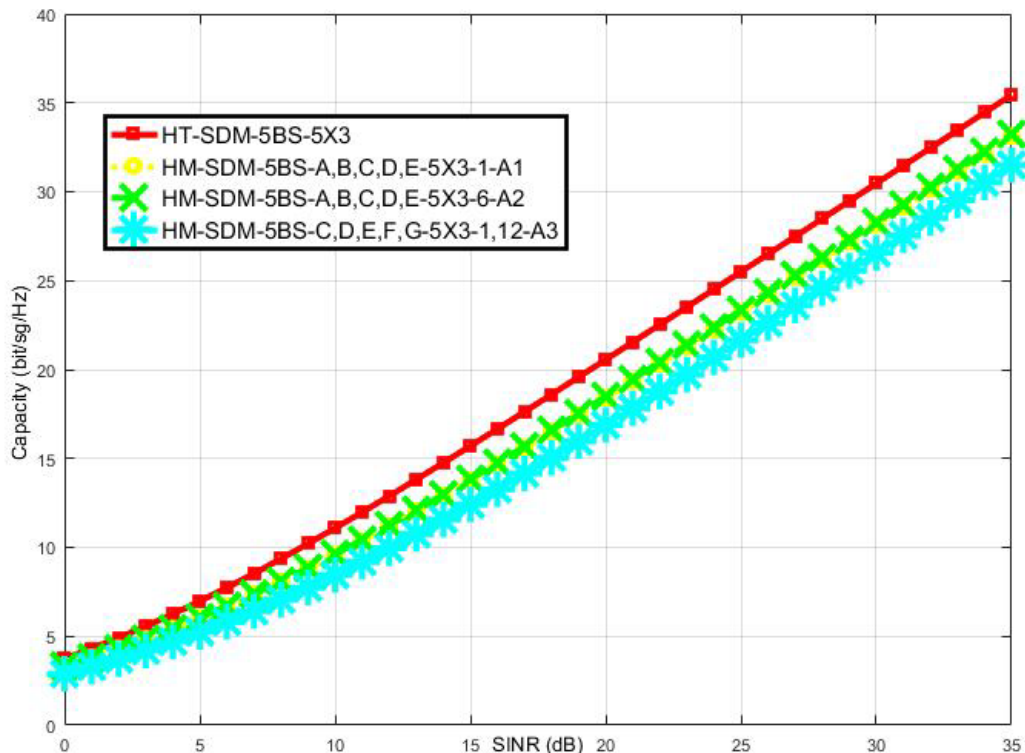


Figura 3-1. Gráfica de resultados de capacidad. HM-SDM-5BS-5X3-a

En la figura 3.1 se presenta los resultados de la capacidad para cada sistema en función de la SINR. La capacidad teórica es la mejor, y no hay mucha relación de la capacidad con la correlación. No obstante, el sistema que tiene menos capacidad es el tercero, que es el que tiene la correlación mayor, lo cual es lógico, cuanto menos correlado, mayor capacidad, aunque la diferencia de capacidad con los otros sistemas no es muy significativa.

### 3.2.2 Sistema formado por 5 BS. Caso b.

Pruebo variando las BS para que sean menos correladas entre sí, y veo que sale. Lo llamo: Análisis b.

Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Formado por 5 BS. 5 antena transmisora x 3 antenas receptoras. Caso B. Esquemáticamente se representa como: HM-SDM-5BS-5X3-b

Se repite el análisis variando las BS elegidas, para analizar cómo afecta al coeficiente de correlación. Se toman sistemas en los que se varía las BS elegidas, pero se mantienen el número de antenas y de BS elegidas en el caso a, anterior.

Se siguen analizando 3 antenas receptoras en el equipamiento de usuario y una 1 antena trasmisora en cada BS, utilizando 5 BS.

El sistema A1, se sigue manteniendo como el caso anterior. En el sistema A2 y A3 se trata de no elegir en el mismo sistema las BS2 y BS3 (BS de absorbentes las dos) y las BS4 y BS5 (BS de garrafas las dos), para disminuir la correlación del sistema.

Se mantiene los mismos números de antenas elegidas en el estudio anterior.

Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Formado por 5 BS. Se trabaja en los escenarios A, B, C, D y E. 5 antenas transmisoras x 3 antenas receptoras. Se elige la antena 1. Análisis A1. Esquemáticamente se representa como: HM-SDM-5BS-A,B,C,D,E-5X3-1-A1

Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Formado por 5 BS. Se trabaja en los escenarios A, B, C, D y E. 5 antenas transmisoras x 3 antenas receptoras. Se elige las antenas 1 y 6 alternativamente.

Análisis A2. Esquemáticamente se representa como: HM-SDM-5BS-A,B,D,F, G-5X3-1,6-A2

Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Formado por 5 BS. Se trabaja en los escenarios A, C, E, F y G. 5 antenas transmisoras x 3 antenas receptoras. Se elige la antena 1 y 12 alternativamente.

Análisis A3. Esquemáticamente se representa como: HM-SDM-5BS-A,C,E,F,G-5X3-1,12-A3

Los valores elegidos de BS y antenas se presentan en la tabla 3.2:

SISTEMA	ANTENAS TRASMISORAS					Correlación media
HT-SDM-5BS-5X3						

HM-SDM-5BS-A,B,C,D,E-5X3-1-A1	1	1	1	1	1	0,3148
	BS1	BS2	BS3	BS4	BS5	
HM-SDM-5BS-A,B,D,F, G-5X3-1,6-A2	1	6	1	6	1	0,1511
	BS1	BS2	BS4	BS6	BS7	
HM-SDM-5BS-A,C,E,F,G-5X3-1,12-A3	1	12	1	12	1	0,4674
	BS1	BS3	BS5	BS6	BS7	

Tabla 3-2. Antenas elegidas. HM-SDM-5BS-5X3-b

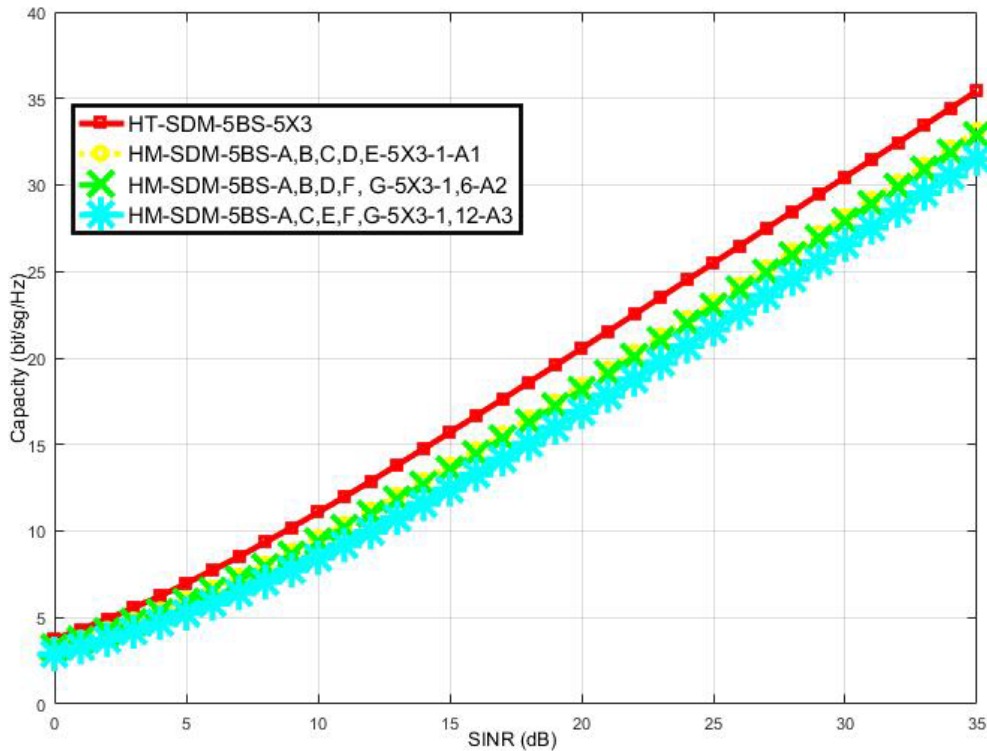


Figura 3-2. Gráfica de resultados de capacidad. HM-SDM-5BS-5X3-b

A partir del resultado de la figura 3.2, el sistema A2, menos correlado es el que tiene mayor capacidad, pero sigue siendo poca diferencia, ya que el número de antenas elegidos es pequeño, y la correlación afecta poco a la capacidad.

Tomando 5 BS en el análisis veo que no existe una relación importante entre la capacidad y la correlación, a pesar de haber variado las BS elegidas y las antenas dentro de cada BS.

En los siguientes análisis se prueba a repetir el análisis con solo 3 BS, y el mismo número de antenas totales.

### 3.2.3 Sistema formado por 3 BS.

Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Formado por 3 BS. 5 antena transmisora x 3 antenas receptoras. Esquemáticamente se representa como: HM-SDM-3BS-5X3

En este análisis se toman 5 antenas repartidas en 3 BS, se usan: 2 antenas receptoras en 2 BS y una antena en una BS.

Se repite el análisis 3 veces, modificando las BS elegidas, y los números de las antenas elegidas de cada BS.

En el primer análisis, A, elijo las 3 primeras BS, y las antenas número 1 y 2 de las BS1 y BS2 y la número 1 de la BS3. Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Formado por 3 BS. Se trabaja en los escenarios A, B y C. 5 antenas transmisoras x 3 antenas receptoras. Se elige la antena 1 y 2. Análisis A. Esquemáticamente se representa como:HM-SDM-3BS-A,B,C-5X3-1,2-A

En el segundo análisis, B, elijo las BS3, BS4, y BS5, pero elijo las antenas números 1 y 6 de BS3 y BS4, y la número 1 de la BS5. Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Formado por 3 BS. Se trabaja en los escenarios C, D y E. 5 antenas transmisoras x 3 antenas receptoras. Se elige la antena 1 y 6. Análisis B. Esquemáticamente se representa como HM-SDM-3BS-C,D,E-5X3-1,6-B

En el tercer análisis, C, elijo las BS3, BS6, y BS7, pero elijo las antenas números 1 y 12 de BS3 y BS6, y la número 1 de la BS7. Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Formado por 3 BS. Se trabaja en los escenarios C, D y F. 5 antenas transmisoras x 3 antenas receptoras. Se elige la antena 1 y 12. Análisis C. Esquemáticamente se representa comoHM-SDM-3BS-C,F,G-5X3-1,12-C

Se mide la capacidad y la correlación en cada caso, para analizar la relación de la capacidad del sistema con la correlación.

2+2+1 antenas trasmisoras en BS.

Los valores elegidos de BS y antenas se presentan en la tabla 3.3:

SISTEMA	ANTENAS TRASMISORAS			Correlación media
HT-SDM-3BS-5X3				
HM-SDM-3BS-A,B,C-5X3-1,2-A	1,2	1,2	1	0,5777
	BS1	BS2	BS3	
HM-SDM-3BS-C,D,E-5X3-1,6-B	1,6	1,6	1	0,1957
	BS3	BS4	BS5	
HM-SDM-3BS-C,F,G-5X3-1,12-C	1,12	1,12	1	0,1148
	BS3	BS6	BS7	

**Tabla 3-3. Antenas elegidas. HM-SDM-3BS-5X3**

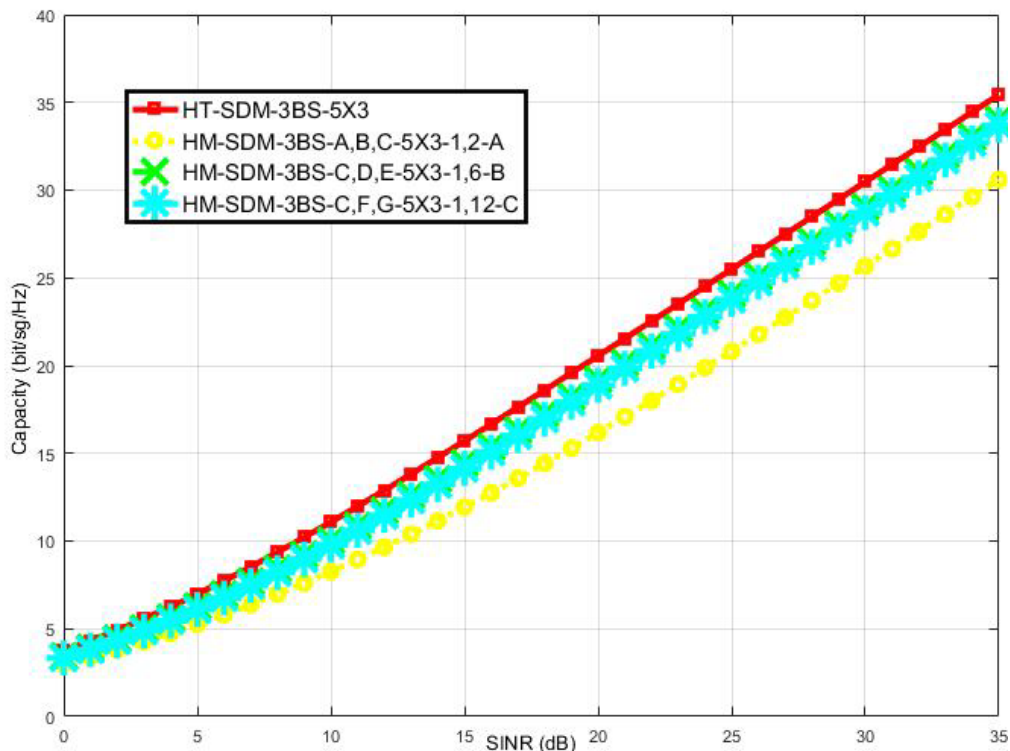


Figura 3-3. Gráfica resultados de capacidad. HM-SDM-3BS-5X3

En el resultado obtenido en la figura 3.3, se observa que el Sistema A tiene mucho peor capacidad que los sistemas B y C, que son prácticamente iguales. La correlación del sistema A es mucho mayor que la del sistema B y C, con lo cual podemos ver que cuando la correlación es grande, la capacidad se ve afectada de forma significativa.

En este caso las correlaciones son más dependientes de las BS elegidas, que de los números de antenas dentro de cada BS, ya que el número de antenas sigue siendo pequeño.

En este caso en el que el número de BS elegidas es menor, influye más la correlación total del sistema en la capacidad. Aun así, hay que observar que la correlación del caso A es mucho mayor que el de los otros dos casos, con lo que es lógico que la capacidad se vea afectada.

#### 3.2.4 Sistema formado por 2 BS.

Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Formado por 2 BS. 5 antena transmisora x 3 antenas receptoras. Esquemáticamente se representa como: HM-SDM-2BS-5X3

Se repiten los análisis anteriores, pero reduciendo el número de BS a 2, y manteniendo el número de antenas.

Como se toman 5 antenas y 2 BS, se distribuyen como: 3 antenas receptoras en una BS y 2 antenas en otra BS.

Se repite el análisis 4 veces, modificando las BS elegidas, y los números de las antenas elegidas de cada BS.

En el primer análisis, D, se eligen las 2 primeras BS, y las antenas números 1, 2 y 3 de la BS1 y las números 1 y 2 de la BS2. Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Formado por 2 BS. Se trabaja en los escenarios Ay B. 5 antenas transmisoras x 3 antenas receptoras. Se elige las antenas 1, 2 y 3. Análisis D. Esquemáticamente se representa como:HM-SDM-2BS-A,B-5X3-1,2,3-D

En el segundo análisis, E, elijen la BS3, y las antenas números 1, 3 y 6 de la BS4 y los números 1 y 6. Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Formado por 2 BS. Se trabaja en los escenarios C y D. 5 antenas transmisoras x 3 antenas receptoras. Se elige las antenas 1, 3 y 6. Análisis E. Esquemáticamente se representa como: HM-SDM-2BS-C,D-5X3-1,3,6-E

En el tercer análisis, F, elijen la BS5, y las antenas números 1, 6 y 12 de la BS6 y los números 1 y 12. Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Formado por 2 BS. Se trabaja en los escenarios E y F. 5 antenas transmisoras x 3 antenas receptoras. Se elige las antenas 1, 6 y 12. Análisis F. Esquemáticamente se representa como: HM-SDM-2BS-E,F-5X3-1,6,12-F

En el cuarto análisis, G, elijen la BS6, y las antenas números 1, 6 y 12 de la BS7 y los números 1 y 6. Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Formado por 2 BS. Se trabaja en los escenarios F y G. 5 antenas transmisoras x 3 antenas receptoras. Se elige las antenas 1, 6 y 12. Análisis G. Esquemáticamente se representa como:HM-SDM-2BS-F,G-5X3-1,6,12-G

Se mide la capacidad y la correlación en cada caso, para analizar la relación de la capacidad del sistema con la correlación.

3+2 antenas trasmisoras en BS

Los valores elegidos de BS y antenas se presentan en la tabla 3.4:

SISTEMA	ANTENAS TRASMISORAS		Correlación media
HT-SDM-2BS-5X3			
HM-SDM-2BS-A,B-5X3-1,2,3-D	1,2,3	1,2	0,588
	BS1	BS2	
HM-SDM-2BS-C,D-5X3-1,3,6-E	1,3,6	1,6	0,3908
	BS3	BS4	
HM-SDM-2BS-E,F-5X3-1,6,12-F	1,6,12	1,12	0,1603
	BS5	BS6	
HM-SDM-2BS-F,G-5X3-1,6,12-G	1,6,12	1,6	0,26
	BS6	BS7	

**Tabla 3-4. Antenas elegidas. HM-SDM-2BS-5X3**

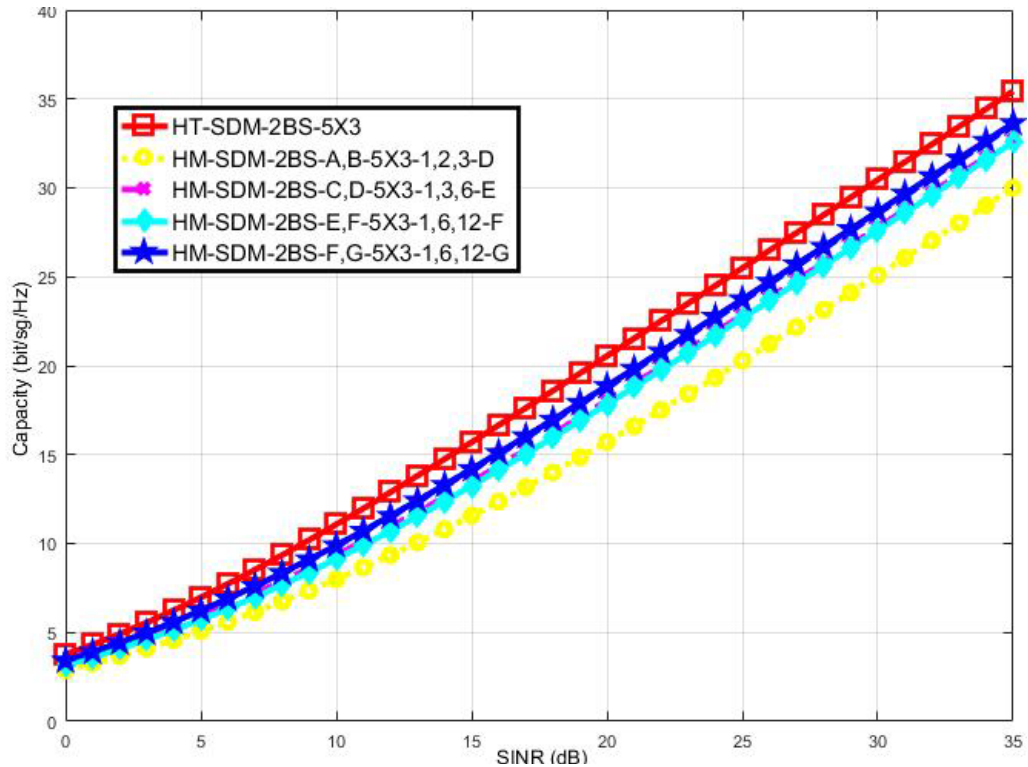


Figura 3-4 .Gráfica resultados de capacidad. HM-SDM-2BS-5X3

En el resultado obtenido en la figura 3.4, se observa que los resultados son que el sistema D, el que tiene menos capacidad, y que tiene una correlación muy alta.

El sistema E tiene prácticamente la misma capacidad que el sistema F, aunque la correlación del sistema F es casi la mitad que la del sistema E.

El sistema G es el que tiene mayor capacidad, aunque no es el que tiene menor correlación.

El sistema G debería ser peor que el sistema F, si solo importara la correlación.

En general cuando las correlaciones son altas, la capacidad del sistema baja, pero no sigue totalmente la capacidad a la correlación, al menos en un número pequeño de antenas. También hay otros parámetros que afectan a la capacidad, como son las potencias que emitan cada BS, que veremos en siguientes capítulos.

### 3.2.5 Sistema formado por 1 BS.

Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Formado por 1 BS. 5 antenas transmisoras x 3 antenas receptoras. Esquemáticamente se representa como: HM-SDM-1BS-5X3

Se repiten los análisis anteriores, pero reduciendo el número de BS a 1, y manteniendo el número total de antenas. Es un sistema MIMO en realidad, pero se trata como sistema DMIMO por seguir la comparación.



Como se toman 5 antenas y 1 BS, se distribuyen como: 5 antenas receptoras en una BS.

Se repite el análisis 4 veces, modificando las antenas elegidas, y los números de las BS.

En el primer análisis, H, se eligen las 5 antenas primeras y la BS1. Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Formado por 1 BS. Se trabaja en el escenario A. 5 antenas transmisoras x 3 antenas receptoras. Se elige las antenas 1, 2, 3,4 y 5. Análisis H. Esquemáticamente se representa como: HM-SDM-1BS-A-5X3-1,2,3,4,5-H

En el segundo análisis, I, se eligen la BS2, y las antenas números 1, 3, 5, 7, y 9. Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Formado por 1 BS. Se trabaja en el escenario B. 5 antenas transmisoras x 3 antenas receptoras. Se elige las antenas 1, 3, 5, 7 y 9. Análisis I. Esquemáticamente se representa como: HM-SDM-1BS-B-5X3-1,3,5,7,9-I

En el tercer análisis, J, se eligen la BS3, y las antenas números 1, 2, 4, 8, y 12. Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Formado por 1 BS. Se trabaja en el escenario C. 5 antenas transmisoras x 3 antenas receptoras. Se elige las antenas 1, 2, 4, 8 y 12. Análisis J. Esquemáticamente se representa como: HM-SDM-1BS-C-5X3-1,2, 4, 8, 12-J

En el cuarto análisis, K, se eligen la BS4, y las antenas números 8, 9, 10, 11, y 12. Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Formado por 1 BS. Se trabaja en el escenario D. 5 antenas transmisoras x 3 antenas receptoras. Se elige las antenas 8, 9, 10, 11 y 12. Análisis K. Esquemáticamente se representa como: HM-SDM-1BS-D-5X3-8,9,10,11,12-K

Se mide la capacidad y la correlación en cada caso, para analizar la relación de la capacidad del sistema con la correlación.

5 antena trasmisoras en cada BS.

SISTEMA	ANTENAS TRASMISORAS	Correlación media
HT-SDM-1BS-5X3		
HM-SDM-1BS-A-5X3-1,2,3,4,5-H	1,2,3,4,5	0,7804
	BS1	
HM-SDM-1BS-B-5X3-1,3,5,7,9-I	1,3,5,7,9	0,7736
	BS2	
HM-SDM-1BS-C-5X3-1,2, 4, 8, 12-J	1,2, 4, 8, 12	0,7183
	BS3	
HM-SDM-1BS-D-5X3-8,9,10,11,12-K	8,9,10,11,12	0,8829
	BS4	

**Tabla 3-5. Antenas elegidas .HM-SDM-1BS-5X3.**

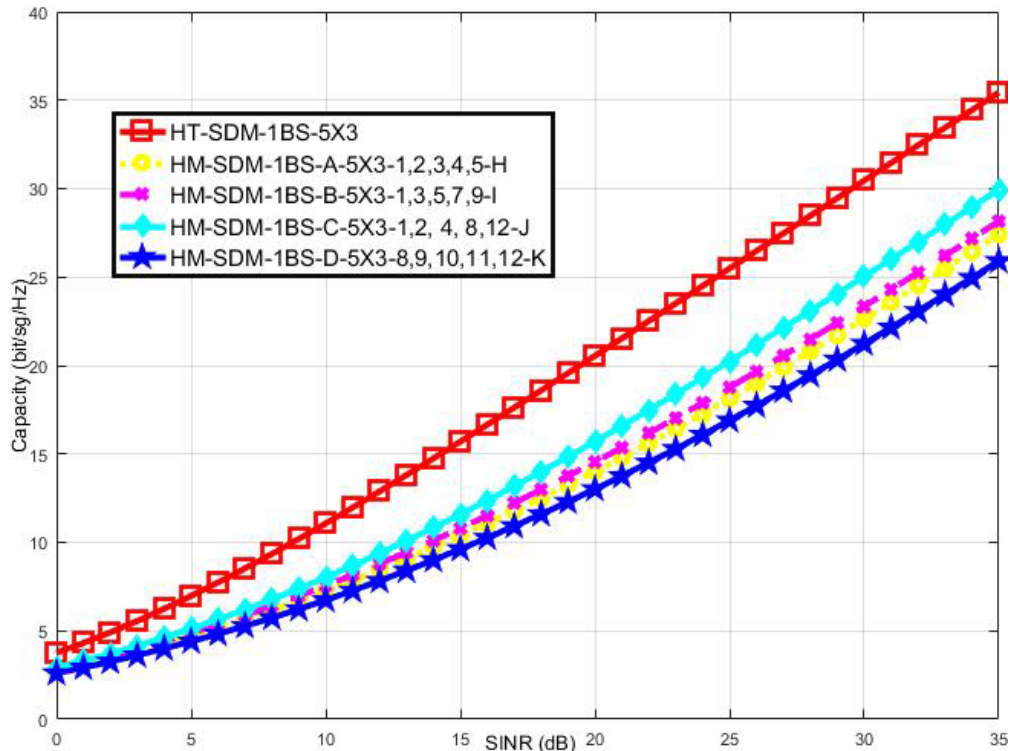


Figura 3-5. Gráfica resultados de capacidad. HM-SDM-1BS-5X3.

Este sistema de una sola BS tiene peor capacidad, en todos los casos en general, que los sistemas anteriores, ya que los valores de capacidad están por debajo de los 30 bits/sg/Hz, y en las figuras anteriores están los valores por encima de los 30 bits/sg/Hz para valores de una SINR(35dB).

Al usar una sola BS en cada análisis los valores del grado de correlación son mayores que en los otros sistemas anteriores, ya que son todas las antenas de las mismas BS en cada análisis. Al ser mayor la correlación disminuye la capacidad en general para todos los sistemas.

Las correlaciones de los 4 sistemas soy muy parecidas y muy altas. Las capacidades de los sistemas son pequeñas en comparación de los casos anteriores, con más BS. Se observa que el sistema de mayor capacidad es el sistema J, que es el de menor correlación. El sistema que le sigue es el sistema I, que es el siguiente de menor correlación, y el siguiente sistema con respecto a la capacidad es el sistema H, que es el siguiente de menor correlación. Por último, el sistema K, es el que tiene menor capacidad y menor correlación.

Estos sistemas siguen la norma de que cuanto más incorrelados, mayor capacidad.

No obstante, las diferencias de correlación media son muy pequeñas entre un sistema y otro, y en cambio las capacidades varían de una forma bastante visible siguiendo los valores de la correlación.

Al usar una sola BS, las variaciones de correlación entre antenas son muy apreciables en capacidades de los sistemas.

En correlaciones elevadas, parece que las capacidades son más sensibles que en correlaciones bajas.

Comparando los 5 casos, se observa que la capacidad total del sistema varía poco en función de si se cogen unas antenas más o menos cercanas (correladas) entre sí dentro de cada BS o incluso si se cogen unas BS u otras, ya que la correlación en general se mantiene por debajo de 0,5, e influye poco en la capacidad, excepto en el último caso que no trabaja con un sistema DMIMO, sino que la ser una sola BS trabajo con un sistema MIMO, y en este caso sí le influye el grado de correlación aunque sea pequeño el número de antenas.

No obstante, el último caso estudiado, en el que solo se toma una BS, aunque se cogen el mismo número de antenas (5 antenas) la correlación es alta, por encima de 0,5, y la capacidad del sistema es baja de forma apreciable con respecto a los casos anteriores.

Este caso de 5 antenas diferentes en una sola BS, es un sistema MIMO, que no mejora mucho la capacidad, en cambio los otros 4 casos en los que se toman más de una BS son sistemas MIMO distribuidos, si se observa que mejora la capacidad de forma notable.

No obstante, no hay una mejora importante en la capacidad entre usar 2 BS o usar 5 BS (con el mismo número de antenas totales).

### 3.3 Sistema D-MIMO 7x3

En este análisis se aumenta el número de antenas transmisoras a 7, y se varia en diferentes análisis el número de BS en los que se reparten las 7 antenas. Para cada sistema que se analiza se obtiene la capacidad para valores de SINR espaciados 5dB de 0 a 35 dB. Así mismo para cada sistema analizado se obtiene el grado de correlación, para estudiar si existe relación entre la capacidad de cada sistema y el grado de correlación obtenido según la BS elegida y las antenas de cada BS.

El resultado se comparará con el caso anterior, para comprobar si varía la capacidad al aumentar el número de antenas.

Se realizan 4 análisis, uno en el que se reparten las 7 antenas transmisoras en 7 BS, se llamará cada análisis  $A_i$ , el segundo en el que se reparten las 7 antenas transmisoras en 4 BS, se llamará cada análisis  $B_i$ , el tercero en el que se reparten las 7 antenas transmisoras en 3 BS, se llamará cada análisis  $C_i$ , el cuarto análisis en el que se reparten las 7 antenas transmisoras en una BS, se llamará cada análisis  $D_i$ .

#### 3.3.1 Sistema formado por 7 BS.

Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Formado por 7 BS. 7 antenas transmisoras x 3 antenas receptoras. Esquemáticamente se representa como: HM-SDM-7BS-7X3

En este análisis se reparten las 7 antenas transmisoras en 7 BS. Como se toman 7 antenas y 7 BS, se reparten como: 1 antena transmisora en cada BS.

Se eligen las antenas aleatoriamente. En función de las diferentes antenas elegidas, tengo 3 casos posibles.

En el primer análisis, A1, elijo la antena número 1. Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Formado por 7 BS. Se trabaja en el escenario A,B,C,D,E,F y G. 7 antenas transmisoras x 3 antenas receptoras. Se elige la antena 1. Análisis A1. Esquemáticamente se representa como: HM-SDM-7BS-A,B,C,D,E,F,G-7X3-1-A1

En el segundo análisis, A2, elijo las antenas números 1 Y 6 alternativamente. Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Formado por 7 BS. Se trabaja en el escenario A,B,C,D,E,F y G. 7 antenas transmisoras x 3 antenas receptoras. Se elige la antena 1 y 6. Análisis A2. Esquemáticamente se representa como: HM-SDM-7BS-A,B,C,D,E,F,G-7X3-1,6-A2

En el tercer análisis, A3, elijo las antenas números 1 Y 12 alternativamente. Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Formado por 7 BS. Se trabaja en el escenario A,B,C,D,E,F y G. 7 antenas transmisoras x 3 antenas receptoras. Se elige la antena 1 y 12. Análisis A3. Esquemáticamente se representa como HM-SDM-7BS-A,B,C,D,E,F,G-7X3-1,12-A3

SISTEMA	ANTENAS TRANSMISORAS							Correlación media
HT-SDM-7BS-7X3								
HM-SDM-7BS-A,B,C,D,E,F,G-7X3-1-A1	1	1	1	1	1	1	1	0,1177
	BS1	BS2	BS3	BS4	BS5	BS6	BS7	
HM-SDM-7BS-A,B,C,D,E,F,G-7X3-1,6-A2	1	6	1	6	1	6	1	0,1072
	BS1	BS2	BS3	BS4	BS5	BS6	BS7	
HM-SDM-7BS-A,B,C,D,E,F,G-7X3-1,12-A3	1	12	1	12	1	12	1	0,1345
	BS1	BS2	BS3	BS4	BS5	BS6	BS7	

**Tabla 3-6. Antenas elegidas. HM-SDM-7BS-7X3.**

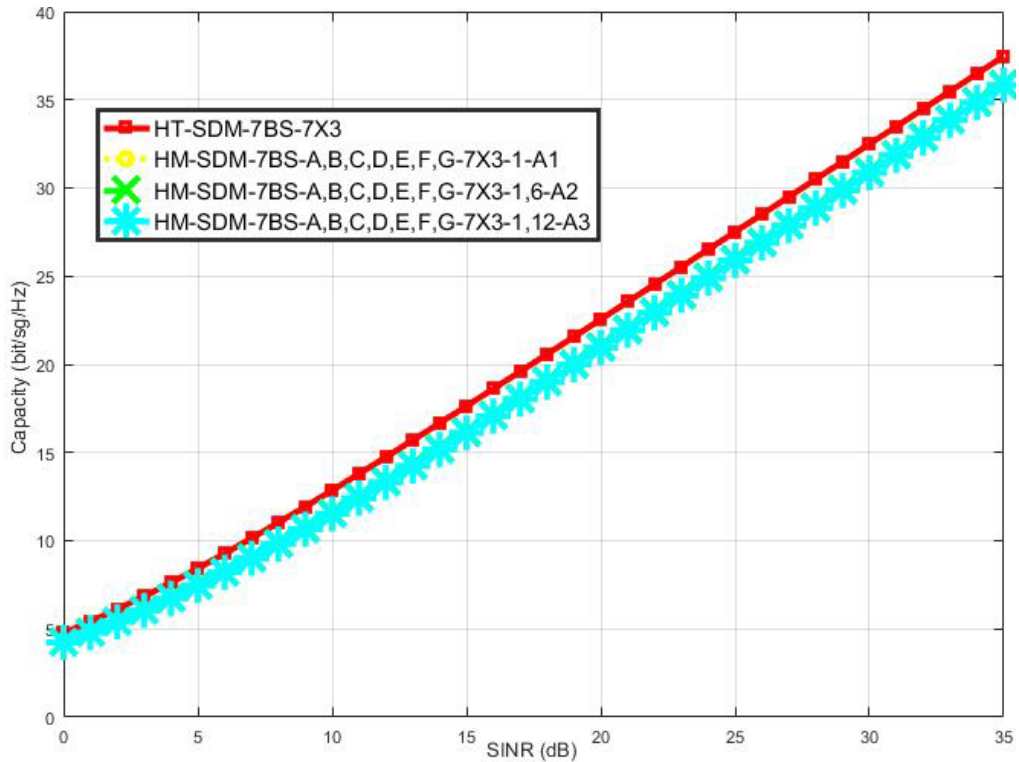


Figura 3-6. Gráfica resultados de capacidad. HM-SDM-7BS-7X3.

Las 3 figuras son muy parecidas, una encima de las otras. Tienen la misma capacidad. No hay variación, ya que las correlaciones medias son muy parecidas. No afectan las correlaciones.

Las capacidades en general son mayores que el caso anterior, y se aproximan al caso teórico.

En conclusión, no influye la antena elegida cuando el número de antenas elegidas es pequeño y el número de BS es grande en proporción.

### 3.3.2 Sistema formado por 4 BS.

Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Formado por 4 BS. 7 antenas transmisoras x 3 antenas receptoras. Esquemáticamente se representa como: HM-SDM-4BS-7X3

Se repiten los análisis anteriores, pero reduciendo el número de BS a 4, y manteniendo el número de antenas.

En este caso se reparten las 7 antenas distribuidas en 4 BS: 2 antenas transmisoras en 3 BS y 1 en una BS.

De las diferentes antenas elegidas, tengo 3 casos posibles.

En el primer análisis, B1, se eligen las antenas números 1 y 2 en las BS1, BS2 y BS3, y la antena 1 en la BS4. Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida,

HM. Sistema DMIMO, SDM. Formado por 4 BS. Se trabaja en el escenario A, B, C y D. 7 antenas transmisoras x 3 antenas receptoras. Se elige la antenna 1 y 2. Análisis B1. Esquemáticamente se representa como: HM-SDM-4BS-A, B, C, D-7X3-1,2-B1

En el segundo análisis, B2, se eligen las antenas números 1 y 5 en las BS4, BS5 y BS6, y la antenna 1 en la BS7. Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Formado por 4 BS. Se trabaja en el escenario D, E, F, y G. 7 antenas transmisoras x 3 antenas receptoras. Se elige la antenna 1 y 5. Análisis B2. Esquemáticamente se representa como: HM-SDM-4BS-D, E, F, G-7X3-1,5-B2

En el tercer análisis, B3, se eligen las antenas números 6 y 12 en las BS4, BS5 y BS6, y la antenna 12 en la BS7. Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Formado por 4 BS. Se trabaja en el escenario D, E, F, y G. 7 antenas transmisoras x 3 antenas receptoras. Se elige la antenna 6 y 12. Análisis B3. Esquemáticamente se representa como: HM-SDM-4BS-D, E, F, G-7X3-6,12-B3

2+2+2+1 antenas transmisoras en BS.

SISTEMA	ANTENAS TRANSMISORAS				Correlación media
HT-SDM-4BS-7X3					
HM-SDM-4BS-A,B,C,D-7X3-1,2-B1	1,2	1,2	1,2	1	0,4638
	BS1	BS2	BS3	BS4	
HM-SDM-4BS-D,E,F,G,-7X3-1,5-B2	1,5	1,5	1,5	1	0,1150
	BS4	BS5	BS6	BS7	
HM-SDM-4BS-D,E,F,G-7X3-6,12-B3	6,12	6,12	6,12	12	0,0933
	BS4	BS5	BS6	BS7	

Tabla 3-7. Antenas elegidas. HM-SDM-4BS-7X3.

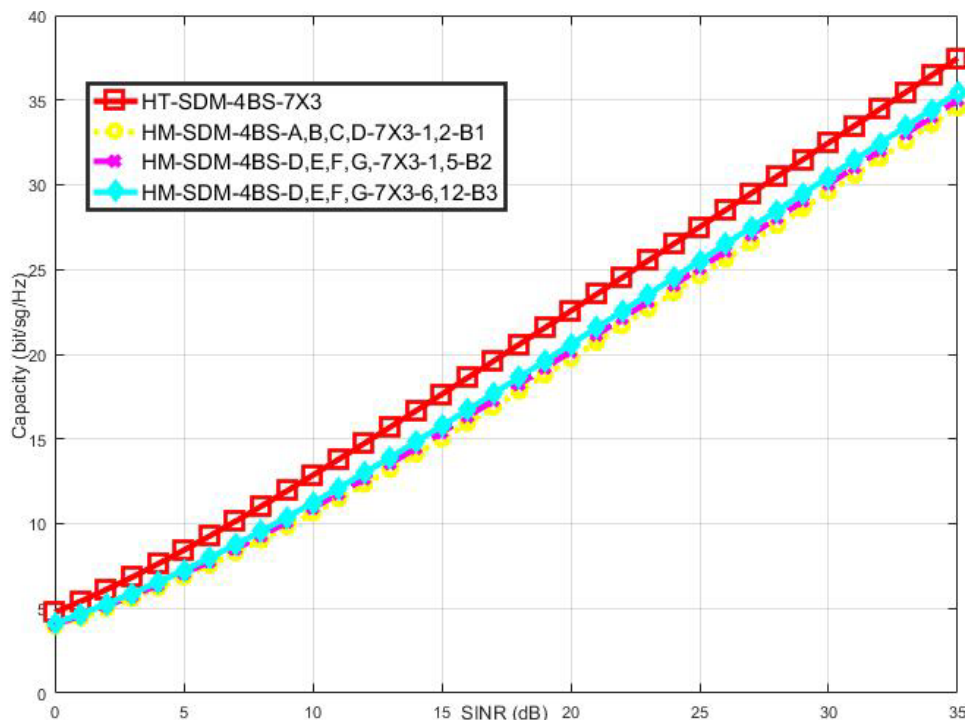


Figura 3-7. Gráfica resultados de capacidad. HM-SDM-4BS-7X3.

Los tres sistemas B1, B2 y B3 están próximos al valor teórico, pero menos que el caso anterior con 7BS, ya que se ha reducido el número de antenas.

La capacidad de sistema B3 es mayor que la del sistema B2 y mayor que la del sistema B1, mejora un poco en cada caso, ya que las correlaciones disminuyen.

No mejora excesivamente, casi despreciable.

Hay mucha diferencia de correlación entre el sistema B1 y los otros dos sistemas, y en cambio hay poca diferencia de capacidad, aunque sea un poco mejor, pero no es proporcional la capacidad obtenida con la diferencia de correlación. Como comentamos anteriormente, hay otros factores como la relación entre las potencias que emiten cada BS, que afectan a la capacidad. En el análisis B1 se eligen Bs diferentes los de los análisis B2 y B3. Ese estudio se realiza en capítulos posteriores a éste.

### 3.3.3 Sistema formado por 3 BS.

Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Formado por 3 BS. 7 antenas transmisoras x 3 antenas receptoras. Esquemáticamente se representa como: HM-SDM-3BS-7X3

Se repiten los análisis anteriores, pero reduciendo el número de BS a 3, y manteniendo el número de antenas.

En este caso se toman 7 antenas distribuidas en 3 BS: 3 antenas transmisoras en 1 BS y 2 antenas en 2 BS.

De las diferentes antenas elegidas, se obtienen 3 casos posibles.

En el primer análisis, C1, se elige las antenas números 1, 2 y 3 en la BS1, y las antenas 1 y 2 en las BS2 y BS3. Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Formado por 3 BS. Se trabaja en el escenario A, B y C. 7 antenas transmisoras x 3 antenas receptoras. Se elige la antena 1, 2 y 3. Análisis C1. Esquemáticamente se representa como: HM-SDM-3BS-A,B,C-7X3-1,2,3-C1

En el segundo análisis, C2 se elige las antenas números 1, 3 y 6 en la BS4, y las antenas 1 y 3 en las BS5 y BS6. Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Formado por 3 BS. Se trabaja en el escenario D, E y F. 7 antenas transmisoras x 3 antenas receptoras. Se elige la antena 1, 3 y 6. Análisis C2. Esquemáticamente se representa como: HM-SDM-3BS-D,E,F-7X3-1,3,6-C2

En el tercer análisis, C3, se elige las antenas números 1, 6 y 12 en la BS5 y las antenas 1 y 6 en las BS6 y BS7. Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Formado por 3 BS. Se trabaja en el escenario E, F y G. 7 antenas transmisoras x 3 antenas receptoras. Se elige la antena 1, 6 y 12. Análisis C3. Esquemáticamente se representa como: HM-SDM-3BS-E,F,G-7X3-1,6,12-C3

3+2+2 antena trasmisora en BS.

SISTEMA	ANTENAS TRANSMISORAS			Correlación media
HT-SDM-3BS-7X3				
HM-SDM-3BS-A,B,C-7X3-1,2,3-C1	1,2,3	1,2	1,2	0,5808
	BS1	BS2	BS3	
HM-SDM-3BS-D,E,F-7X3-1,3,6-C2	1,3,6	1,3	1,3	0,1807
	BS4	BS5	BS6	
HM-SDM-3BS-E,F,G-7X3-1,6,12-C3	1,6,12	1,6	1,6	0,1654
	BS5	BS6	BS7	

Tabla 3-8. Antenas elegidas. HM-SDM-3BS-7X3.

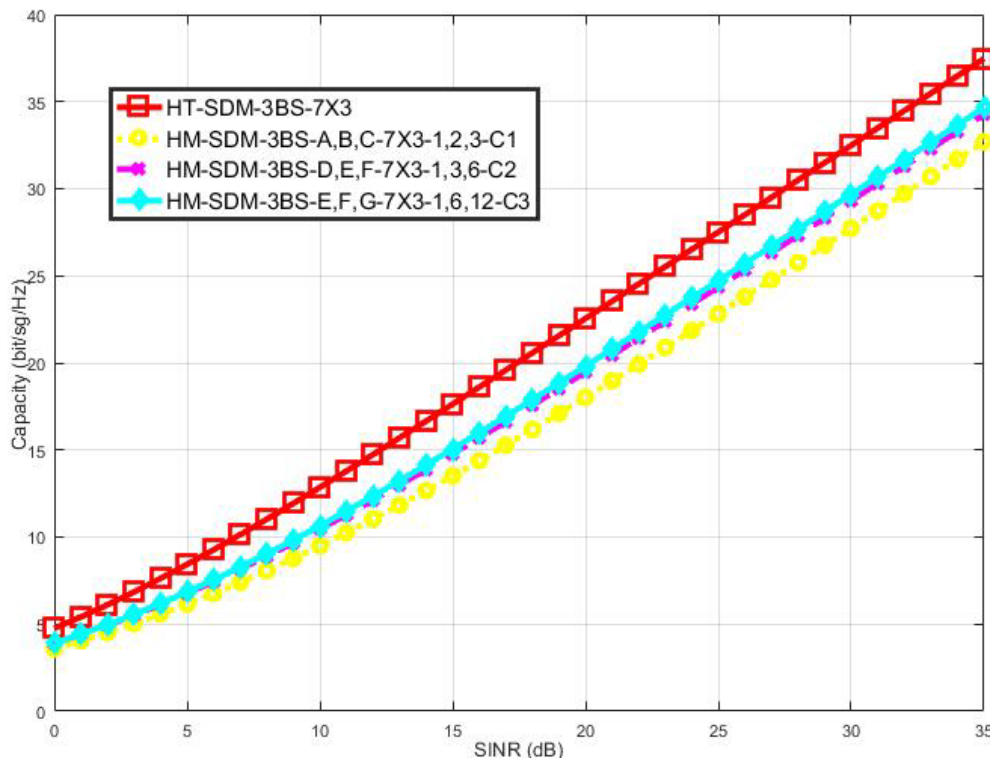


Figura 3-8. Gráfica resultados de capacidad. HM-SDM-3BS-7X3.

La capacidad obtenida en los sistemas C son peores que los sistemas A y B, que utiliza menos BS.

El sistema C1 tiene menor capacidad que los sistemas C2 y C3. Lo cual concuerda con la correlación obtenida. Estos últimos son prácticamente iguales, ya que las correlaciones de C2 y C3 son prácticamente iguales y bastantes menores que C1. Lógicamente al reducir el número BS, se reduce la capacidad, aunque se mantenga el número de antenas totales.

### 3.3.4 Sistema formado por 1 BS.



Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Formado por 1 BS. 7 antenas transmisoras x 3 antenas receptoras. Esquemáticamente se representa como: HM-SDM-1BS-7X3.

Se repiten los análisis anteriores, pero reduciendo el número de BS a 1, y manteniendo el número de antenas. Es realidad es un caso de sistema MIMO.

En este caso se toman 7 antenas distribuidas en 1 BS: 7 antenas trasmisoras en una BS. De las diferentes antenas elegidas, tenemos 4 casos posibles. Se varia las antenas elegidas con la intención de variar la correlación.

En el primer análisis, D1, se elige las antenas números 1,2,3,4,5,6,7 en la BS1. Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Formado por 1 BS. Se trabaja en el escenario A. 7 antenas transmisoras x 3 antenas receptoras. Se elige la antena 1,2,3,4,5,6 y 7. Análisis D1. Esquemáticamente se representa como: HM-SDM-1BS-A-7X3-1,2,3,4,5,6,7-D1

En el segundo análisis, D2 se elige las antenas números 1,3,5,7,9,11,12 en la BS2. Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Formado por 1 BS. Se trabaja en el escenario A. 7 antenas transmisoras x 3 antenas receptoras. Se elige la antena 1,3,5,7,9,11 y 12. Análisis D2. Esquemáticamente se representa como: HM-SDM-1BS-A-7X3-1,3,5,7,9,11,12-D2

En el tercer análisis, D3, se elige las antenas números 1,3,5, 6,7,9,11, en la BS3. Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Formado por 1 BS. Se trabaja en el escenario A. 7 antenas transmisoras x 3 antenas receptoras. Se elige la antena 1,3,5,6,7,9 y 11. Análisis D3. Esquemáticamente se representa como: HM-SDM-1BS-A-7X3-1,3,5, 6,7,9,11-D3

En el cuarto, D4, se elige las antenas números 2, 3, 5, 6,7,10,11, en la BS4. Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Formado por 1 BS. Se trabaja en el escenario A. 7 antenas transmisoras x 3 antenas receptoras. Se elige la antena 2,3,5,6,7,10 y 11. Análisis D4. Esquemáticamente se representa como: HM-SDM-1BS-A-7X3-2,3,5,6,7,10,11-D4

7 antenas trasmisoras en una BS.

SISTEMA	ANTENAS TRANSMISORAS	Correlación media
HT-SDM-1BS-7X3		
HM-SDM-1BS-A-7X3-1,2,3,4,5,6,7-D1	1,2,3,4,5,6,7	0,7017
	BS1	
HM-SDM-1BS-A-7X3-1,3,5,7,9,11,12-D2	1,3,5,7,9,11,12	0,6908
	BS2	
HM-SDM-1BS-A-7X3-1,3,5, 6,7,9,11-D3	1,3,5, 6,7,9,11	0,8108
	BS3	
HM-SDM-1BS-A-7X3-2,3,5,6,7,10,11-D4	7,11,3,6,10,2,5	0,6411
	BS4	

**Tabla 3-9. Antenas elegidas. HM-SDM-1BS-7X3.**

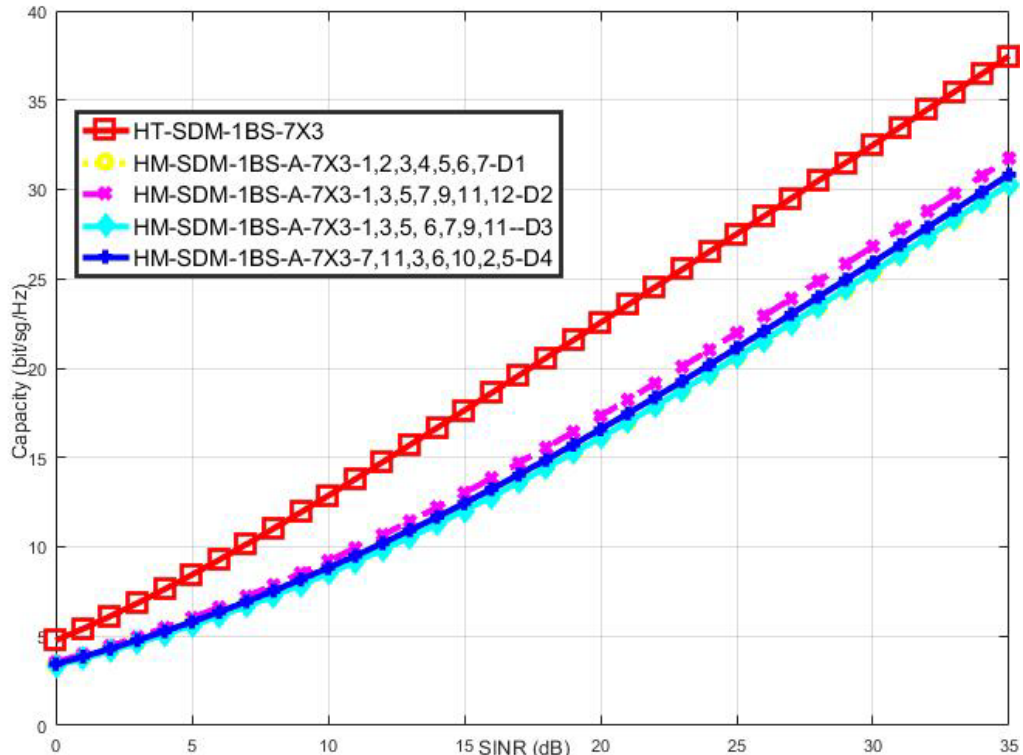


Figura 3-9. Gráfica resultados de capacidad. HM-SDM-1BS-7X37.

El sistema D es el sistema que tiene menor valor de capacidad, ya que solo tiene una BS. Está claro que los sistemas DMIMO cuantas más BS estén implicadas mayor capacidad tiene el sistema. No hay mejoría apreciable al usar los diferentes sistemas D1, D2, D2 y D4. Las correlaciones de los 4 casos D son mucho mayores que en los casos A, B y C, y proporcionalmente hay menos diferencia entre las correlaciones. Se observa que la capacidad está más distante del caso ideal, al usar una sola BS. Las correlaciones solo tienen influencia en la capacidad en sistemas DMIMO, cuando se varían las BS, el variar solo la antenna elegida no varía mucho la capacidad.

Usando 7 antenas receptoras ocurre lo mismo que cuando usamos 5 antenas receptoras, lo que realmente mejora es usar sistemas MIMO distribuidos. Este caso con 7 antenas tiene mayor capacidad que el de 5 antenas, con una sola BS en los 2 casos, pero la mejora es pequeña.

### 3.4 Sistema DM-MIMO 10x3

Se aumenta el número de antenas, y varía el número de BS en todo el análisis, manteniendo el número de antenas en el análisis para ver cómo varía la capacidad.

Se analiza un sistema DMIMO formado por 10 antenas transmisoras y 3 antenas receptoras. Las antenas transmisoras se distribuyen en diferentes BS, dependiendo del sistema que se analice. Para cada sistema que se analiza se obtiene la capacidad para valores de SINR espaciados 5dB de 0 a 35 dB. Así mismo para cada sistema

analizado se obtiene el grado de correlación, para estudiar si existe relación entre la capacidad de cada sistema y el grado de correlación obtenido según la BS elegida y las antenas de cada BS.

Se realizan 4 análisis, uno en el que se reparten las 10 antenas transmisoras en 7 BS, se llamará cada análisis  $A_i$ , el segundo en el que se reparten las 10 antenas transmisoras en 5 BS, se llamará cada análisis  $B_i$ , el tercero en el que se reparten las 10 antenas transmisoras en 2 BS, se llamará cada análisis  $C_i$ , el cuarto análisis en el que se reparten las 10 antenas transmisoras en una BS, se llamará cada análisis  $D_i$ .

#### 3.4.1 Sistema formado por 7 BS.

Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Formado por 7 BS. 10 antenas transmisoras x 3 antenas receptoras. Esquemáticamente se representa como: HM-SDM-7BS-10X3

Se repiten los análisis anteriores, pero tomando el número de BS de 7, y usando 10 antenas transmisoras.

En este caso se toman 10 antenas distribuidas en 7 BS: 1 antena transmisoras en 4 BS y 2 antenas transmisoras en 3 BS.

Como se toman 7 BS, se usan todas las BS. De las diferentes antenas elegidas, se obtienen 3 casos posibles.

En el primer análisis,  $A_1$ , se eligen las antenas números 1 en las BS1, BS2, BS3 y BS4 y las antenas números 1 y 2 en la BS5, BS6 y BS7. Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Formado por 7 BS. Se trabaja en los escenarios A,B, C,D,E,F y G. 10 antenas transmisoras x 3 antenas receptoras. Se elige la antena 1 y 2. Análisis  $A_1$ . Esquemáticamente se representa como: HM-SDM-7BS-A,B, C,D,E,F,G-10X3-1,2- $A_1$

En el segundo análisis,  $A_2$ , se eligen las antenas números 1 en la BS1 la antena número 6 en las BS2 y BS4, la antena número 12 en la BS3, las antenas número 1 y 6 en la BS5 y las antenas números 6 y 12 en las BS6 y BS7. Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Formado por 7 BS. Se trabaja en los escenarios A, B, C,D,E,F y G. 10 antenas transmisoras x 3 antenas receptoras. Se elige la antena 1 y 6. Análisis  $A_2$ . Esquemáticamente se representa como: HM-SDM-7BS-A,B C,D,E,F,G-10X3-1,6- $A_2$

En el tercer análisis,  $A_3$ , se eligen las antenas números 1 en la BS7 la antena número 6 en las BS6 y BS4, la antena número 12 en la BS5, las antenas número 1 y 6 en la BS3 y las antenas números 6 y 12 en las BS1 y BS2. Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Formado por 7 BS. Se trabaja en los escenarios A,B, C,D,E,F y G. 10 antenas transmisoras x 3 antenas receptoras. Se elige la antena 1 y 2. Análisis  $A_3$ . Esquemáticamente se representa como: HM-SDM-7BS-6,12, C,D,E,F,G-10X3-1,2- $A_3$

1+1+1+1+2+2+2 antenas trasmisoras en BS.

SISTEMA	ANTENAS TRANSMISORAS							Correlación media
HT-SDM-7BS-10X3								
HM-SDM-7BS-A,B, C,D,E,F,G-10X3-1,2-A1	1	1	1	1	1,2	1,2	1,2	0,139
	BS1	BS2	BS3	BS4	BS5	BS6	BS7	
HM-SDM-7BS-A,B, C,D,E,F,G-10X3-1,6-A2	1	6	12	6	1,6	6,12	6,12	0,100
	BS1	BS2	BS3	BS4	BS5	BS6	BS7	
HM-SDM-7BS-6,12, C,D,E,F,G-10X3-1,2-A3	1	6	12	6	1,6	6,12	6,12	0,157
	BS7	BS6	BS5	BS4	BS3	BS2	BS1	

Tabla 3-10. Antenas elegidas. HM-SDM-7BS-10X3.

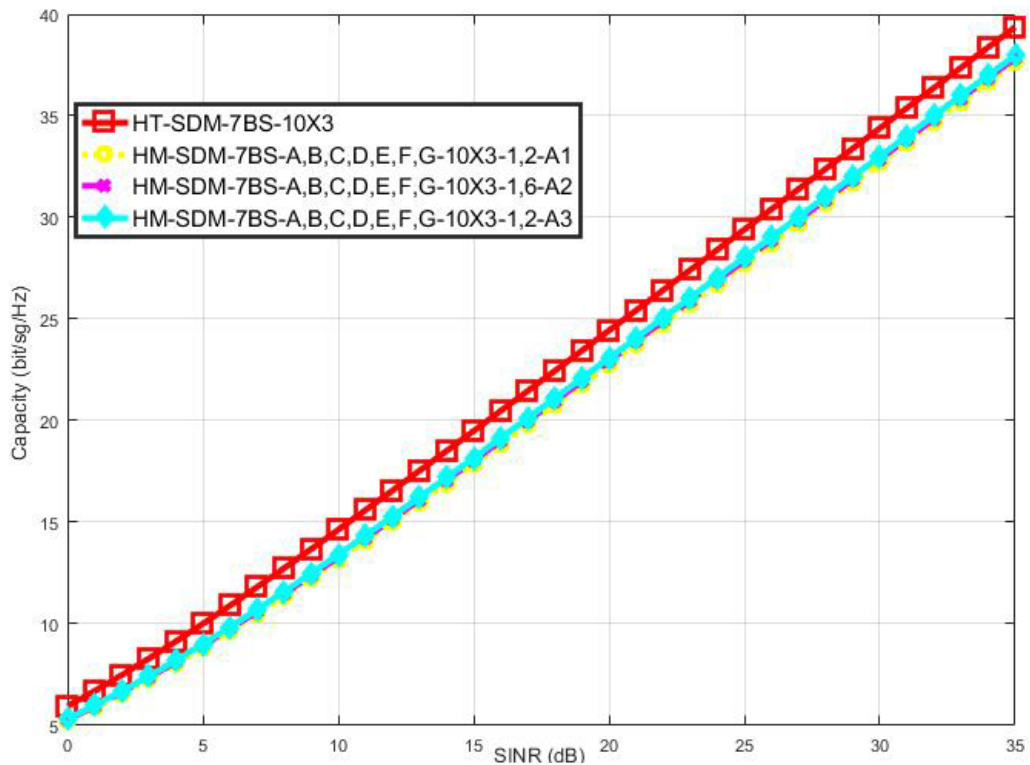


Figura 3-10. Gráfica resultados de capacidad. HM-SDM-7BS-10X3.

Todas las capacidades de todos los sistemas de 7 BS se aproximan al valor teórico. Todos los sistemas Ai son iguales, no hay mejora dependiendo que antenas receptoras se elijan. Estos sistemas A tiene mayores capacidades que los sistemas anteriores, ya que usan 7 BS y las correlaciones son menores. Al utilizar el número máximo, disponible, de BS se obtienen los sistemas con capacidad máxima.

### 3.4.2 Sistema formado por 5 BS.

Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Formado por 5 BS. 10 antenas transmisoras x 3 antenas receptoras. Esquemáticamente se representa como: HM-SDM-5BS-10X3

En este caso se toman 10 antenas distribuidas en 5 BS: 2 antenas trasmisoras en cada BS.

En función de las diferentes antenas elegidas, se tienen 4 casos posibles.

En el primer análisis, B1, se eligen las antenas números 1 y 2 en las BS1, BS2, BS3, BS4 y BS5. Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Formado por 5 BS. Se trabaja en los escenarios A,B, C,D y E. 10 antenas transmisoras x 3 antenas receptoras. Se elige la antena 1 y 2. Análisis B1. Esquemáticamente se representa como: HM-SDM-5BS-A,B,C,D,E-10X3-1,2-B1

En el segundo análisis, B2, se eligen las antenas números 1 y 5 en las BS1, BS2, BS5 BS6y BS7. Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Formado por 5 BS. Se trabaja en los escenarios A,B,E,F y G. 10 antenas transmisoras x 3 antenas receptoras. Se elige la antena 1 y 5. Análisis B2. Esquemáticamente se representa como: HM-SDM-5BS-A,B,E,F,G-10X3-1,5-B2

En el tercer análisis, B3, se eligen las antenas números 6 y 12 en las BS1, BS2, BS3 BS4y BS6. Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Formado por 5 BS. Se trabaja en los escenarios A,B,C,D y F. 10 antenas transmisoras x 3 antenas receptoras. Se elige la antena 6 y 10. Análisis B3. Esquemáticamente se representa como: HM-SDM-5BS-A,B,C,D,F-10X3-6,10-B3

En el cuarto análisis, B4, se eligen las antenas números 1 y 4 en la BS1, las antenas números 3 y 7 en la BS2, las antenas números 6 y 10 en la BS3, las antenas números 9 y 1 en la BS4, las antenas números 12 y 4 en la BS5. Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Formado por 5 BS. Se trabaja en los escenarios A,B,C,D y E. 10 antenas transmisoras x 3 antenas receptoras. Se elige la antena 1 y 4. Análisis B4. Esquemáticamente se representa como: HM-SDM-5BS-A,B,C,D,E-10X3-1,4-B4

2+2+2+2+2 antenas trasmisoras en BS.

SISTEMA	ANTENAS TRANSMISORAS					Correlación media
HT-SDM-5BS-10X3						
HM-SDM-5BS-A,B,C,D,E-10X3-1,2-B1	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	0,2988
	BS1	BS2	BS3	BS4	BS5	
HM-SDM-5BS-A,B,E,F,G-10X3-1,5-B2	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	0,1445
	BS1	BS2	BS5	BS6	BS7	
HM-SDM-5BS-A,B,C,D,F-10X3-6,10-B3	6,12	6,12	6,12	6,12	6,12	0,2068
	BS1	BS2	BS3	BS4	BS6	
HM-SDM-5BS-A,B,C,D,E-10X3-1,4-B4	1,4	3,7	6,10	9,1	12,4	0,2040
	BS1	BS2	BS3	BS4	BS5	

Tabla 3-11. Antenas elegidas. HM-SDM-5BS-10X3.

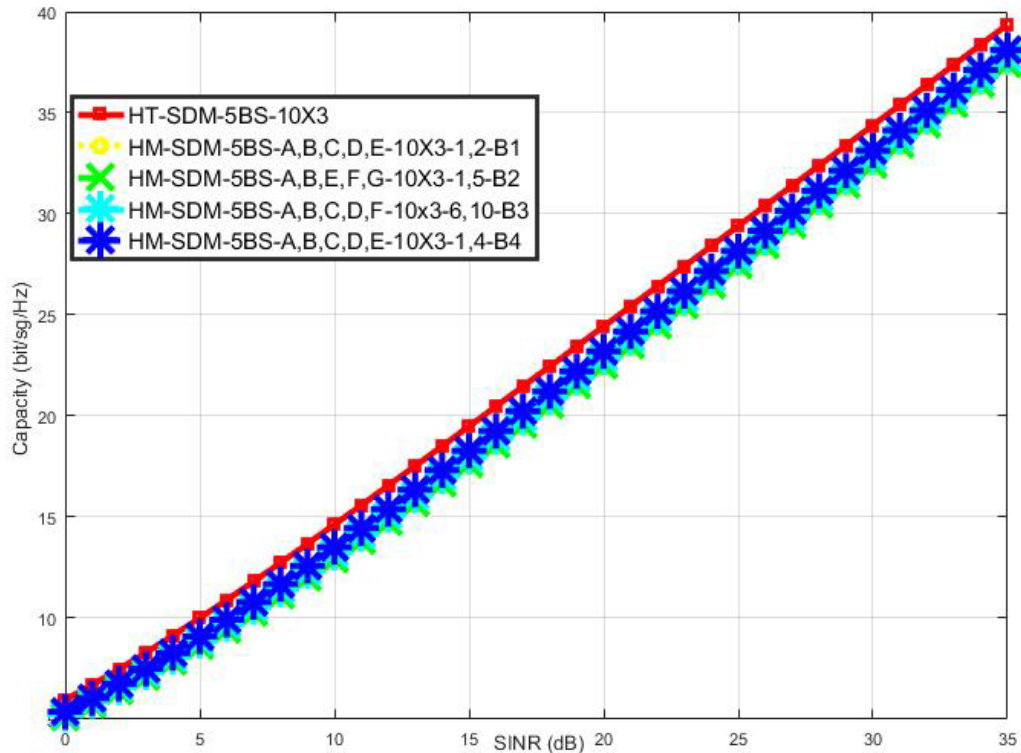


Figura 3-11. Gráfica resultados de capacidad. HM-SDM-5BS-10X3.

Los sistemas B1 y B2 son prácticamente iguales. El sistema B3 mejora un poco, y el sistema B4 mejora otro poco

Las mejoras no son importantes, y las correlaciones medias no afectan.

El sistema mejora poco a poco, pero no tiene relación con las correlaciones medias, ya que el sistema B1 y B2 son prácticamente iguales con correlaciones diferentes, y los sistemas B3 y B4 tienen una correlación media mayor que B2 y son mejores en capacidad.

No obstante, las diferencias no son apreciables.

Al aumentar el número de antenas la capacidad aumenta, pero influye menos la correlación, y las correlaciones no varían apenas en función de las antenas elegidas.

### 3.4.3 Sistema formado por 2 BS.

Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Formado por 2 BS. 10 antenas transmisoras x 3 antenas receptoras. Esquemáticamente se representa como: HM-SDM-2BS-10X3

Se repiten los análisis anteriores, pero reduciendo el número de BS a 2, y manteniendo el número de antenas

En este caso tomo 10 antenas distribuidas en 2 BS: 5 antenas transmisoras en cada BS. En función de las diferentes antenas elegidas, se tienen 4 casos posibles.

En el primer análisis, C1, se eligen las antenas números 1, 2, 3, 4 y 5 en las BS1 y BS2. Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Formado por 2 BS. Se trabaja en los escenarios A y B. 10 antenas transmisoras x 3 antenas receptoras. Se elige las antenas 1,2,3,4 y 5. Análisis C1. Esquemáticamente se representa como: HM-SDM-2BS-A,B-10X30-1,2,3,4,5-C1

En el segundo análisis, C2, se eligen las antenas números 1,3,5,7 y 9 en las BS3 y B42. Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Formado por 2 BS. Se trabaja en los escenarios C y D. 10 antenas transmisoras x 3 antenas receptoras. Se elige las antenas 1,3,5,7 y 9. Análisis C2. Esquemáticamente se representa como: HM-SDM-2BS-C,D-10X30-1,3,5,7,9-C2

En el tercer análisis, C3, se eligen las antenas números 1,3,4,8 y 12 en las BS5 y BS6. Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Formado por 2 BS. Se trabaja en los escenarios E y F. 10 antenas transmisoras x 3 antenas receptoras. Se elige las antenas 1,3,4,8 y 12. Análisis C3. Esquemáticamente se representa como: HM-SDM-2BS-E,F-10X3-1,3,4,8,12-C3

En el cuarto análisis, C4, se eligen las antenas números 2,3,6,9 y 12 en la BS5 y las antenas 1,5,7,9,12 en la BS6. Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Formado por 2 BS. Se trabaja en los escenarios B y F. 10 antenas transmisoras x 3 antenas receptoras. Se elige las antenas 2,3,6,9 y 12. Análisis C4. Esquemáticamente se representa como: HM-SDM-2BS-B,F-10X30-2,3,6,9,12-C4

5+5 antenas trasmisoras en BS.

SISTEMA	ANTENAS TRANSMISORAS		Correlación media
HT-SDM-2BS-10X3			
HM-SDM-2BS-A,B-10X30-1,2,3,4,5-C1	1,2,3,4,5	1,2,3,4,5	0,5566
	BS1	BS2	
HM-SDM-2BS-C,D-10X30-1,3,5,7,9-C2	1,3,5,7,9	1,3,5,7,9	0,4175
	BS3	BS4	
HM-SDM-2BS-E,F-10X3-1,3,4,8,12-C3	1,3,4,8,12	1,3,4,8,12	0,29
	BS5	BS6	
HM-SDM-2BS-B,F-10X30-2,3,6,9,12-C4	2,3,6,9,12	1,5,7,9,12	0,33
	BS2	BS6	

Tabla 3-12. Antenas elegidas.HM-SDM-2BS-10X3.

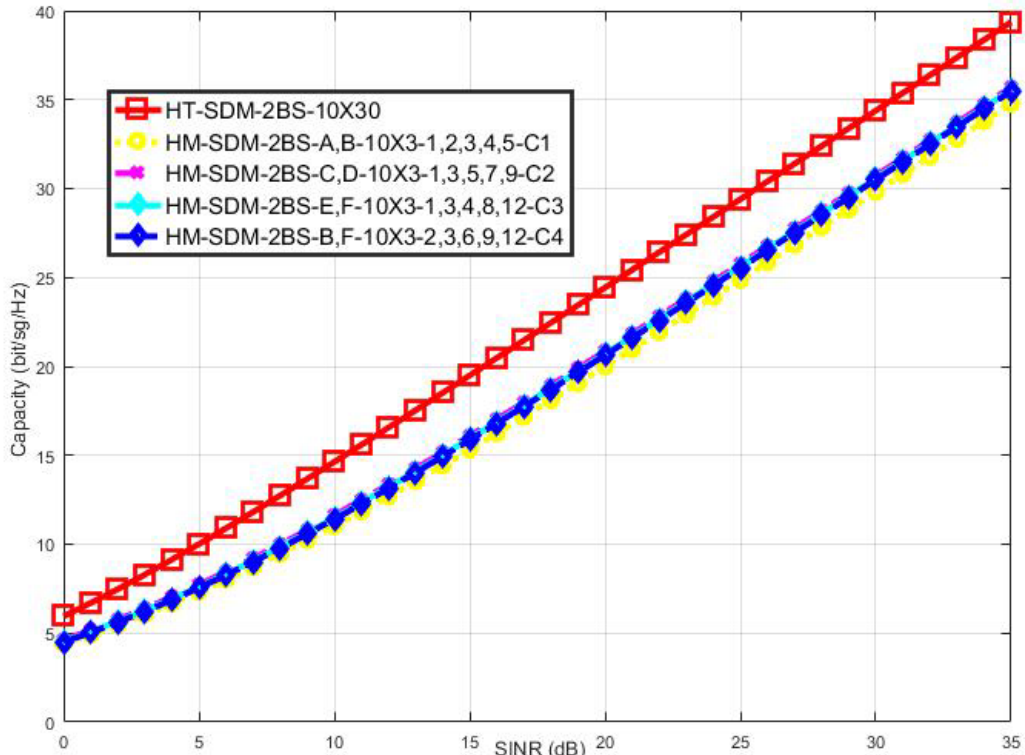


Figura 3-12. Gráfica resultados de capacidad. HM-SDM-2BS-10X3.

Todas las capacidades de este análisis se apartan más que el análisis anterior de la capacidad teórica, al reducir el número de las BS de 5 a 2.

El sistema C1 es tiene una capacidad un poco peor que los demás, ya que tiene la correlación un poco mayor que los demás. El resto de los sistemas tiene la capacidad muy parecidas No obstante las correlaciones del sistema C2 es mucho mayor que la del sistema C3 y las capacidades son prácticamente iguales.

El resultado indica que las correlaciones solo tienen influencia importante en la capacidad del sistema cuando son elevadas.

#### 3.4.4 Sistema formado por 1 BS.

Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Formado por 1 BS. 10 antenas transmisoras x 3 antenas receptoras. Esquemáticamente se representa como: HM-SDM-1BS-10X3

Se repiten los análisis anteriores, pero reduciendo el número de BS a 1, y manteniendo el número de antenas. En realidad, es un sistema MIMO.

En este caso tomo 10 antenas distribuidas en 1 BS: 10 antenas trasmisoras en cada BS.

En función de las diferentes antenas elegidas, se obtienen 4 casos posibles. Se varia la antena elegida con la intención de variar la correlación.

En el primer análisis, D1, se eligen las antenas números 1,2,3,4,5,6,7,8,9 y 10 en la BS1. Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema



DMIMO, SDM. Formado por 1 BS. Se trabaja en el escenario A. 10 antenas transmisoras x 3 antenas receptoras. Se elige las antenas 1,2,3,4,5,6,7,8,9 y 10. Análisis D1. Esquemáticamente se representa como: HM-SDM-1BS-A-10X3-1,2,3,4,5,6,7,8,9,10-D1

En el segundo análisis, D2 se eligen las antenas números 1,2,3,4,5,6,7,8,10 y 12 en la BS2. Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Formado por 1 BS. Se trabaja en el escenario B. 10 antenas transmisoras x 3 antenas receptoras. Se elige las antenas 1,2,3,4,5,6,7,8,10 y 12. Análisis D2. Esquemáticamente se representa como: HM-SDM-1BS-B-10X3-1,2,3,4,5,6,7,8,10,12-D2

En el tercer análisis, D3, se eligen las antenas números 1,2,3,4,5,6,7,8,9 y 12 en la BS3. Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Formado por 1 BS. Se trabaja en el escenario C. 10 antenas transmisoras x 3 antenas receptoras. Se elige las antenas 1,2,3,4,5,6,7,8,9 y 12. Análisis D3. Esquemáticamente se representa como: HM-SDM-1BS-C-10X3-1,2,3,4,5,6,7,8,9,12-D3

En el cuarto, D4, se eligen las antenas números 1,2,3,4,6,7,9,10,11 y 12, en la BS4. Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Formado por 1 BS. Se trabaja en el escenario D. 10 antenas transmisoras x 3 antenas receptoras. Se elige las antenas 1,2,3,4,6,7,9,10,11 y 12. Análisis D4. Esquemáticamente se representa como: HM-SDM-1BS-D-10X3-1,2,3,4,6,7,9,10,11,12-D4

10 antenas trasmisoras en cada BS.

SISTEMA	ANTENAS TRANSMISORAS	Correlación media
HT-SDM-1BS-10X3		
HM-SDM-1BS-A-10X3-1,2,3,4,5,6,7,8,9,10-D1	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10 BS1	0,6132
HM-SDM-1BS-B-10X3-1,2,3,4,5,6,7,8,10,12-D2	1,2,3,4,5,6,7,8,10,12 BS2	0,7485
HM-SDM-1BS-C-10X3-1,2,3,4,5,6,7,8,9,12-D3	1,2,3,4,5,6,7,8,9,12 BS3	0,8150
HM-SDM-1BS-D-10X3-1,2,3,4,6,7,9,10,11,12-D4	1,2,3,4,6,7,9,10,11,12 BS4	0,5820

**Tabla 3-13. Antenas elegidas. HM-SDM-1BS-10X3.**

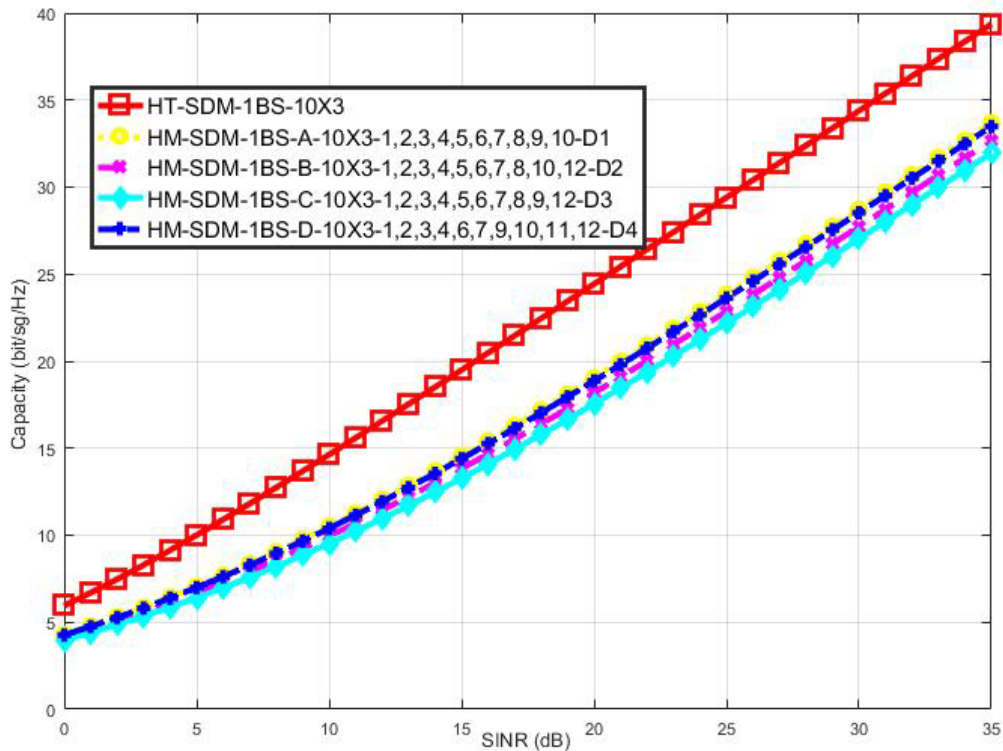


Figura 3-13. Gráfica resultados de capacidad. HM-SDM-1BS-10X30.

Sistema D en general peor que los anteriores, ya que solo uso una BS. El sistema va teniendo menos capacidad conforme aumento la correlación del sistema D1 al D3. El sistema D4 tiene poca correlación y se parece al D1.

En este caso, en el que usamos 10 antenas receptoras se empieza a apreciar que el uso de más BS mejora la capacidad del sistema, en el sistema MIMO distribuido mejora la capacidad si aumentamos el número de antenas utilizadas totales. Así mismo la capacidad total de los sistemas MIMO distribuidos mejora con 10 antenas receptoras con respecto a los sistemas anteriores con el mismo número de BS en el sistema.

### 3.5 Sistema DM-MIMO 20x3

En este análisis se aumenta el número de antenas, y se varia el número de BS en todo el análisis, manteniendo el número de antenas en el análisis para ver cómo varía la capacidad.

Se analiza un sistema DMIMO formado por 20 antenas transmisoras y 3 antenas receptoras. Las antenas transmisoras se distribuyen en diferentes BS, dependiendo del sistema que se analice. Para cada sistema que se analiza se obtiene la capacidad para valores de SINR espaciados 5dB de 0 a 35 dB. Así mismo para cada sistema analizado se obtiene el grado de correlación, para estudiar si existe relación entre la

capacidad de cada sistema y el grado de correlación obtenido según la BS elegida y las antenas de cada BS.

Se realizan 3 análisis, uno en el que se reparten las 20 antenas transmisoras en 7 BS, se llamará cada análisis  $A_i$ , el segundo en el que se reparten las 20 antenas transmisoras en 5 BS, se llamará cada análisis  $B_i$ , el tercero en el que se reparten las 20 antenas transmisoras en 2 BS.

### 3.5.1 Sistema formado por 7 BS.

Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Formado por 7 BS. 20 antenas transmisoras x 3 antenas receptoras. Esquemáticamente se representa como: HM-SDM-7BS-3X20

En este caso se toma 20 antenas distribuidas en 7 BS: 2 antenas transmisoras en una BS y 3 antenas transmisoras en 6 BS.

Como se toman 7 BS, se usan todas. De las diferentes antenas elegidas, tenemos 3 casos posibles.

En el primer análisis,  $A_1$ , se elige las antenas números 1 y 2 en la BS7, y las antenas números 1,2 y 3 en las BS1, BS2, BS3, BS4, BS5 y BS6. Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Formado por 7 BS. Se trabaja en el escenario A,B,C,D,F y G. 20 antenas transmisoras x 3 antenas receptoras. Se elige las antenas 1,2 y 3. Análisis  $A_1$ . Esquemáticamente se representa como: HM-SDM-7BS-A,B,C,D,F,G-20X3-1,2,3- $A_1$

En el segundo análisis,  $A_2$ , se elige las antenas números 1 y 6 en la BS7, y las antenas números 1,5 y 11 en las BS1, BS2, BS3, BS4, BS5 y BS6. Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Formado por 7 BS. Se trabaja en el escenario A,B,C,D,F y G. 20 antenas transmisoras x 3 antenas receptoras. Se elige las antenas 1, 5 y 11. Análisis  $A_2$ . Esquemáticamente se representa como: SDM-7BS-A,B,C,D,F,G-20X3-1,5,11- $A_2$

En el tercer análisis,  $A_3$ , se elige las antenas números 9 y 11 en la BS7, y las antenas números 1,3 y 5 en la BS1, las 2,4, y 6 en la BS2, las 3,5, y 7 en la BS3, las 4,6, y 8 en la BS4, las 5,7 y 9 en la BS5, las 6, 8 y 10 en la BS6. Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Formado por 7 BS. Se trabaja en el escenario A,B,C,D,F y G. 20 antenas transmisoras x 3 antenas receptoras. Se elige las antenas 1, 3 y 5. Análisis  $A_3$ . Esquemáticamente se representa como: HM-SDM-7BS-A,B,C,D,F,G-20X30-1,3,5- $A_3$

3+3+3+3+3+3+2 antenas en transmisoras en BS.

SISTEMA	ANTENAS TRANSMISORAS	Correlación media
---------	----------------------	-------------------

HT-SDM-7BS-20X3								
HM-SDM-7BS-A,B,C,D,F,G-20X3-1,2,3-A1	1,2,3	1,2,3	1,2,3	1,2,3	1,2,3	1,2,3	1,2	0,209
	BS1	BS2	BS3	BS4	BS5	BS6	BS7	
HM-SDM-7BS-A,B,C,D,F,G-20X3-1,5,11-A2	1,5,11	1,5,11	1,5,11	1,5,11	1,5,11	1,5,11	1,6	0,14
	BS1	BS2	BS3	BS4	BS5	BS6	BS7	
HM-SDM-7BS-A,B,C,D,F,G-20X30-1,3,5-A3	1,3,5	2,4,6	3,5,7	4,6,8	5,7,9	6,8,10	9,11	0,17
	BS1	BS2	BS3	BS4	BS5	BS6	BS7	

Tabla 3-14. Antenas elegidas. HM-SDM-7BS-20X3.

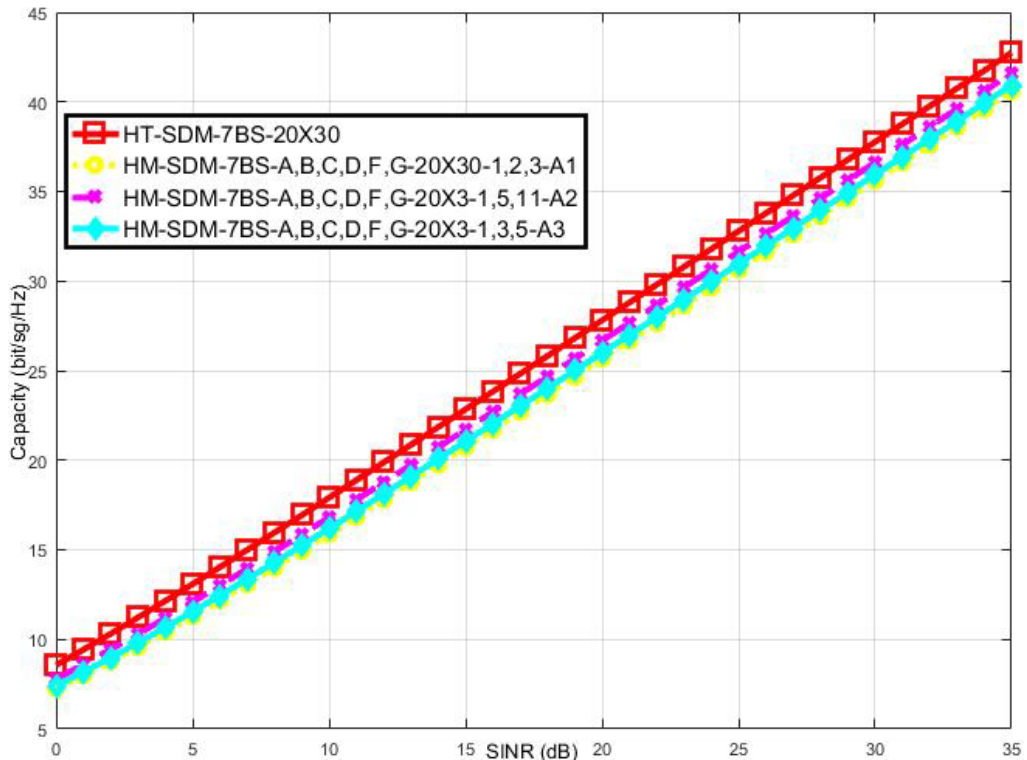


Figura 3-14. Gráfica resultados de capacidad. HM-SDM-7BS-20X3.

Al aumentar el número de BS elegidas aumenta la capacidad total de cada uno de los casos analizados.

Se aprecia que los resultados de capacidad son altos, ya que usamos un número de antenas alto.

Este sistema de 20x3 antenas tiene mayores valores de capacidad que los sistemas anteriores. La capacidad del sistema mejora claramente.

Como las gráficas son muy cercanas al valor teórico, se presenta la diferencia entre el valor teórico y cada una de los análisis.

Se muestra el decremento de capacidad que existe de cada caso con respecto al máximo teórico:

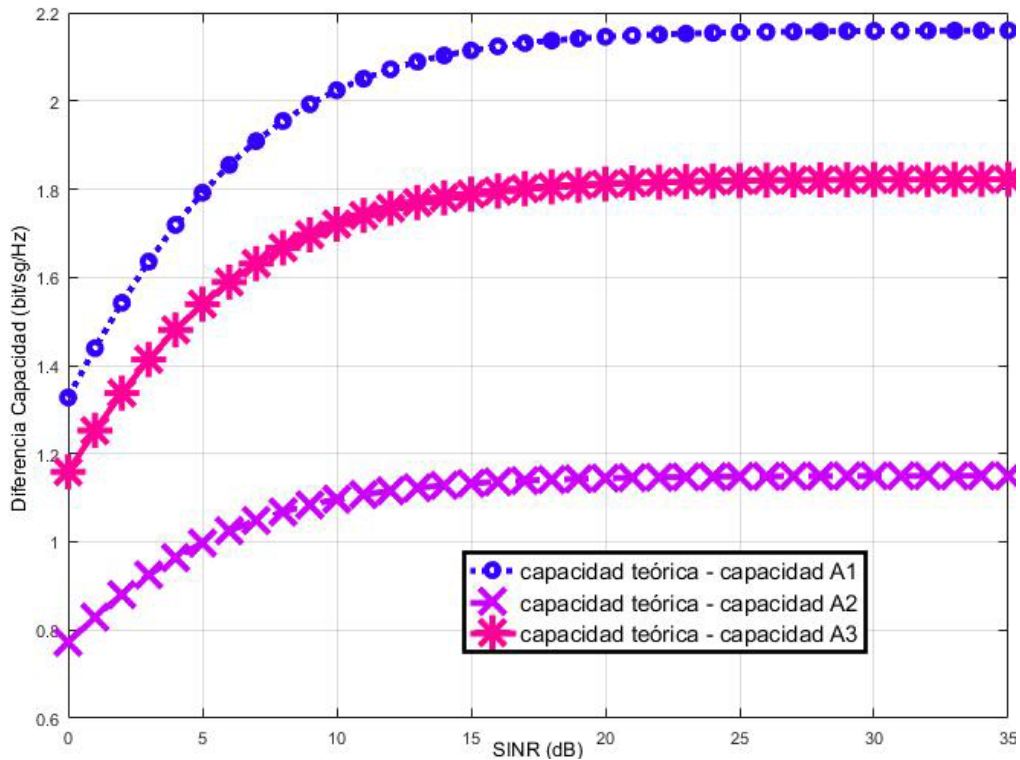


Figura 3-15. Gráfica resultados diferencia entre HT y HM-SDM-7BS-20X3.

Las diferencias respecto al valor teórico son pequeñas, aunque el que tiene mayor diferencia es el sistema A1, que es el que tiene mayor valor de correlación. Y el que tiene menos diferencia del valor teórico es el A2 que tiene menor valor de correlación. Luego la capacidad sigue al valor de la correlación, aunque al usar 20 antenas las diferencias son pequeñas.

El sistema A3 está entre el sistema A1 y A2, ya que su media de correlación está entre los dos.

Al trabajar con 20 antenas receptoras aumenta la capacidad total del sistema, ya que para una SINR de 35 dB la capacidad pasa de 40 bits/sg/Hz, y es más apreciable el usar más BS. La capacidad del sistema aumenta de forma notable cuando usamos 7 BS con respecto a los casos siguientes de 2 BS, pero no es muy notable el aumento de la capacidad con respecto a 5 BS.

### 3.5.2 Sistema formado por 5 BS.

Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Formado por 5 BS. 20 antenas transmisoras x 3 antenas receptoras. Esquemáticamente se representa como: HM-SDM-5BS-20X3

Se analiza un sistema DMIMO con 20 antenas trasmisoras, en 5 BS, de las cuales se varía las BS elegidas para ver cómo varía la capacidad.

En este caso se toma 20 antenas distribuidas en 5 BS: 4 antenas trasmisoras en cada BS.

De las diferentes antenas elegidas, tenemos 3 casos posibles.

En el primer análisis, B1, se elige las antenas números 1, 2, 3 y 4 en las BS1, BS2, BS3, BS4 y BS5. Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Formado por 5 BS. Se trabaja en el escenario A,B,C,D y E. 20 antenas trasmisoras x 3 antenas receptoras. Se elige las antenas 1, 2, 3 y 4. Análisis B1. Esquemáticamente se representa como: HM-SDM-5BS-A,B,C,D,E-20X3-1,2,3,4-B1

En el segundo análisis, B2, se elige las antenas números 1, 5, 9 y 12 en las BS1, BS2, BS3, BS6 y BS7. Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Formado por 5 BS. Se trabaja en el escenario A,B,C,F y G. 20 antenas trasmisoras x 3 antenas receptoras. Se elige las antenas 1,5,9 y 12. Análisis B2. Esquemáticamente se representa como: HM-SDM-5BS-A,B,C,F,G-20X3-1,5,9,12-B2

En el tercer análisis, B3, se elige las antenas números 1, 5, 9 y 12 en las BS1, BS3, BS4, BS5 y BS7. Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Formado por 5 BS. Se trabaja en el escenario A,C,D,E y G. 20 antenas trasmisoras x 3 antenas receptoras. Se elige las antenas 1,5,9 y 12. Análisis B1. Esquemáticamente se representa como: HM-SDM-5BS-A,C,D,E,G-20X3-1,5,9,12-B3

4+4+4+4+4 antenas en trasmisoras en 5 BS.

SISTEMA	ANTENAS TRANSMISORAS					Correlación media
HT-SDM-5BS-20X3						
HM-SDM-5BS-A,B,C,D,E-20X3-1,2,3,4-B1	1,2,3,4	1,2,3,4	1,2,3,4	1,2,3,4	1,2,3,4	0,31
	BS1	BS2	BS3	BS4	BS5	
HM-SDM-5BS-A,B,C,F,G-20X3-1,5,9,12-B2	1,5,9,12	1,5,9,12	1,5,9,12	1,5,9,12	1,5,9,12	0,19
	BS1	BS2	BS3	BS6	BS7	
HM-SDM-5BS-A,C,D,E,G-20X3-1,5,9,12-B3	1,5,9,12	1,5,9,12	1,5,9,12	1,5,9,12	1,5,9,12	0,14
	BS1	BS3	BS4	BS5	BS7	

**Tabla 3-15. Antenas elegidas. HM-SDM-5BS-20X3.**

Resultados capacidad para cada caso B:

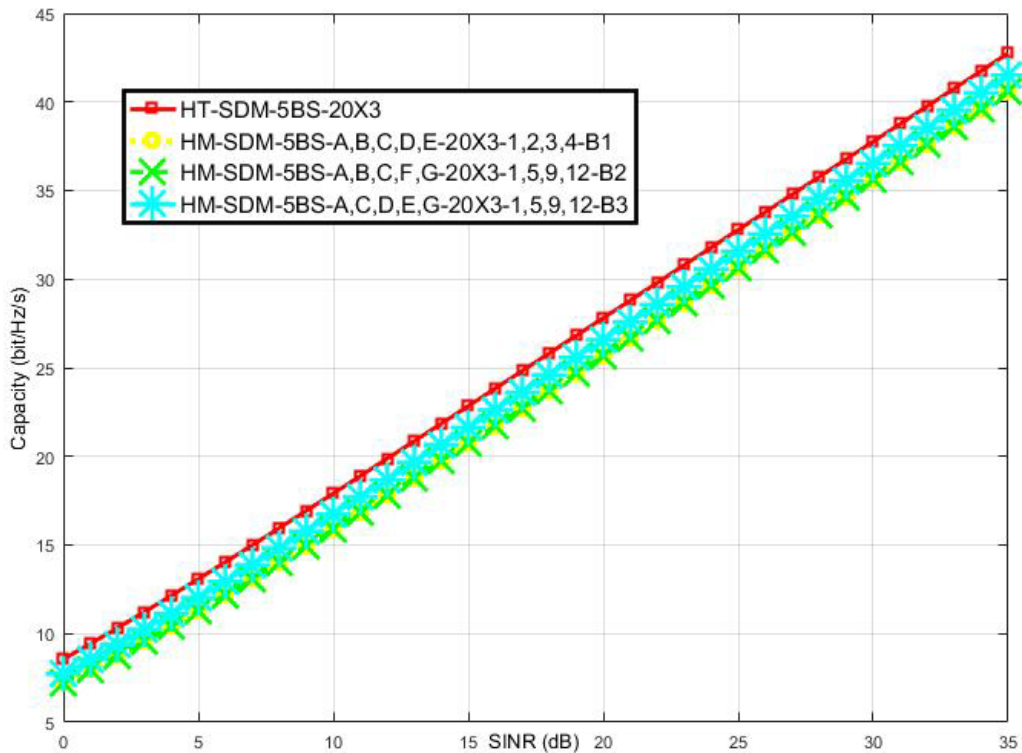


Figura 3-16. Gráfica resultados de capacidad. HM-SDM-5BS-20X3.

Los valores de las capacidades salen muy próximas al valor teórico. Al aumentar el número de antenas receptoras, a 20, se observa que la capacidad aumenta visiblemente. Las correlaciones tienen menos importancia y aunque el sistema A1 es el más correlado, su capacidad, siendo la menor, no es excesivamente diferentes de los otros dos casos.

Para analizar mejor la diferencia entre cada caso representamos la diferencia de capacidades en la siguiente figura, 3.17.

Se muestra el decremento de capacidad que existe de cada caso con respecto al valor teórico:

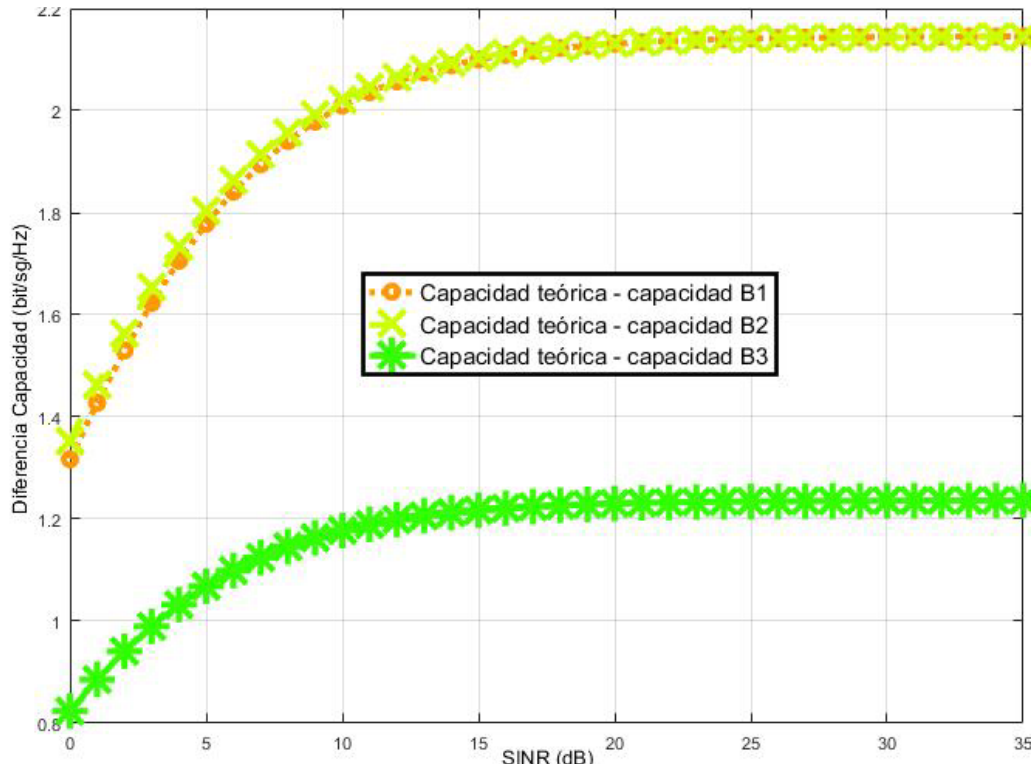


Figura 3-17. Gráfica resultados diferencia entre HT y HM-SDM-5BS-20X3.

Los sistemas B1 y B2 son iguales, no afecta la correlación de las antenas, ya que la correlación del caso B1 es menor que el caso B2.

El sistema B3 tiene mayor valor de capacidad, o lo que es lo mismo, la diferencia respecto al valor máximo es menor, afecta la variación de las BS.

No obstante, la correlación media de B3 es más parecida a B2 que a B1. No está relacionada la correlación media con las capacidades.

Es decir, al aumentar el número de antenas en sistemas DMIMO, con varias BS, y valores de correlación por debajo de 0,5, la correlación empieza a ser menos importante en la capacidad total del sistema.

### 3.5.3 Sistema formado por 2 BS.

Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Formado por 2 BS. 20 antenas transmisoras x 3 antenas receptoras. Esquemáticamente se representa como: HM-SDM-2BS-20X3

Se repiten los análisis anteriores, pero reduciendo el número de BS a 2, y manteniendo el número de antenas.

En este caso se toma 20 antenas distribuidas en 2 BS, 10 antenas transmisoras en cada BS.

De las diferentes antenas elegidas, tenemos 3 casos posibles.

En el primer análisis, C1, se elige las antenas números 1,2,3,4,5,6,7,8,9 y 10 en las BS1 y BS2. Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema



DMIMO, SDM. Formado por 2 BS. Se trabaja en el escenario A y B. 20 antenas transmisoras x 3 antenas receptoras. Se elige las antenas 1,2,3,4,5,6,7,8,9 y 10. Análisis C1. Esquemáticamente se representa como: HM-SDM-2BS-A,B-20X3-1,2,3,4,5,6,7,8,9,10-C1

En el segundo análisis, C2, se elige las antenas números 1,2,3,4,5,6,7,8,9 y 10 en las BS3 y BS6. Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Formado por 2 BS. Se trabaja en el escenario C y F. 20 antenas transmisoras x 3 antenas receptoras. Se elige las antenas 1,2,3,4,5,6,7,8,9 y 10. Análisis C2. Esquemáticamente se representa como: HM-SDM-2BS-C,F-20X3-1,2,3,4,5,6,7,8,9,10-C2

En el tercer análisis, C3, se elige las antenas números 1,2,3,4,5,6,7,8,9 y 11 en la BS4 y las antenas números 1,2,3,4,5,6,7,8,10,12 en la BS7. Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Formado por 2 BS. Se trabaja en el escenario D y G. 20 antenas transmisoras x 3 antenas receptoras. Se elige las antenas 1,2,3,4,5,6,7,8,9 y 10. Análisis C3. Esquemáticamente se representa como: HM-SDM-2BS-D,G-20X3-1,2,3,4,5,6,7,8,9,11-C3

10+10 antenas en transmisoras en BS.

SISTEMA	ANTENAS TRANSMISORAS		Correlación media
HT-SDM-2BS-20X3			
HM-SDM-2BS-A,B-20X3-1,2,3,4,5,6,7,8,9,10-C1	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10	0,455
	BS1	BS2	
HM-SDM-2BS-C,F-20X3-1,2,3,4,5,6,7,8,9,10-C2	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10	0,41
	BS3	BS6	
HM-SDM-2BS-D,G-20X3-1,2,3,4,5,6,7,8,9,11-C3	1,2,3,4,5,6,7,8,9,11	1,2,3,4,5,6,7,8,10,12	0,36
	BS4	BS7	

**Tabla 3-16. Antenas elegidas. HM-SDM-2BS-20X3.**

Resultados capacidad para cada caso C:

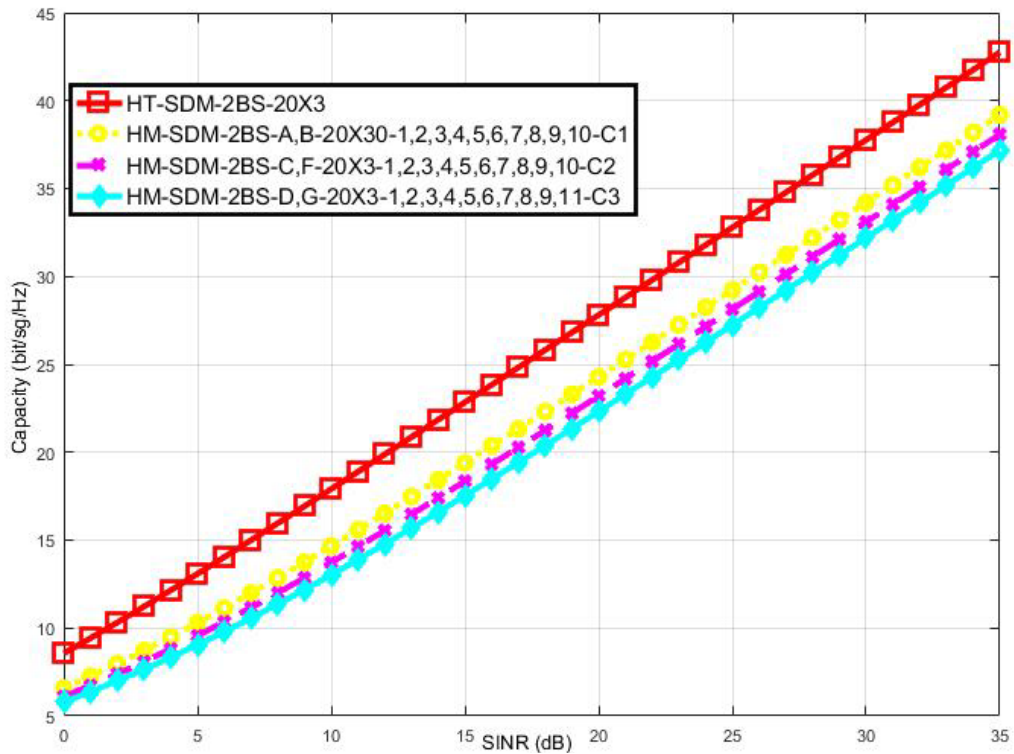


Figura 3-18. Gráfica resultados de capacidad. HM-SDM-2BS-20X3.

Al igual que en los casos anteriores, al reducir el número de BS reduce la capacidad, y las gráficas están menos juntas a la capacidad teórica. Al usar solo 2 BS las capacidades del sistema bajan respecto al análisis anterior, y o sigue a los valores de las correlaciones, ya que el sistema B1 es el más correlado y tiene la capacidad mayor.

Represento el análisis anterior como diferencias, para que se aprecien mejor.

Se muestra el decremento de capacidad que existe de cada caso con respecto al valor teórico:

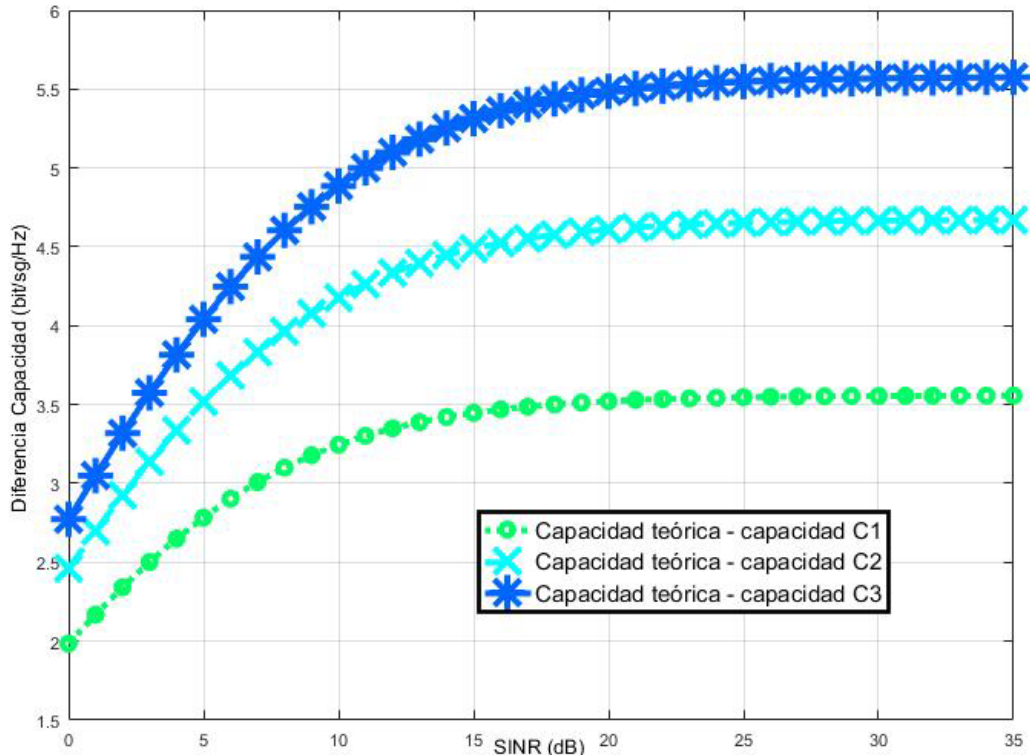


Figura 3-19. Gráfica resultados diferencia entre HT y HM-SDM-2BS-20X3.

Los sistemas se tienen menos valores de capacidad cuanto más separo las BS y disminuye la correlación de los sistemas.

La BS7 es la estación base que tiene sus antenas más correladas de todas las estaciones base.

Las correlaciones no siguen directamente los valores de capacidad, ya que existen otros parámetros que también influyen en la capacidad. En este caso al usar las BS F y G, que emiten con menor potencia, se produce este caso que no siguen las capacidades rigurosamente los valores de capacidad.

En este caso no es suficiente el estudio de las correlaciones medias, ya que la mejora en capacidad es debida a las correlaciones de pico, que hacen que la correlación media aumente, aunque en realidad no sea así.

### 3.6 Sistema DM-MIMO 40x3

En este análisis se aumenta el número de antenas, y se varia el número de BS en todo el análisis, manteniendo el número de antenas en el análisis para ver cómo varía la capacidad.

Se analiza un sistema DM-MIMO formado por 40 antenas transmisoras y 3 antenas receptoras. Las antenas transmisoras se distribuyen en diferentes BS, dependiendo del sistema que se analice. Para cada sistema que se analiza se obtiene la capacidad para valores de SINR espaciados 5dB de 0 a 35 dB. Así mismo para cada sistema analizado se obtiene el grado de correlación, para estudiar si existe relación entre la

capacidad de cada sistema y el grado de correlación obtenido según la BS elegida y las antenas de cada BS.

Se realizan 2 análisis, uno en el que se reparten las 40 antenas transmisoras en 7 BS, se llamará cada análisis  $A_i$ , el segundo en el que se reparten las 40 antenas transmisoras en 4 BS, se llamará cada análisis  $B_i$ .

### 3.6.1 Sistema formado por 7 BS.

Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Formado por 2 BS. 40 antenas transmisoras x 3 antenas receptoras. Esquemáticamente se representa como: HM-SDM-7BS-40X3

En este caso se toma 40 antenas distribuidas en 7 BS: 5 antena transmisoras en 2 BS y 6 antenas transmisoras en 5 BS.

Como se toman 7 BS, se usan todas. De las diferentes antenas elegidas, tenemos 3 casos posibles.

En el primer análisis,  $A_1$ , se elige las antenas números 1, 2, 3, 4 y 5 en las BS1 y BS2 y las antenas números 1, 2, 3, 4, 5 y 6 en la BS3, BS4, BS5, BS6 y BS7. Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Formado por 7 BS. Se trabaja en el escenario A,B,C,D, E,F y G. 40 antenas transmisoras x 3 antenas receptoras. Se elige las antenas 1, 2, 3, 4 y 5 . Análisis  $A_1$ . Esquemáticamente se representa como: HM-SDM-7BS-A,B,C,D, E,F,G-40X3-1,2,3,4,5- $A_1$

En el segundo análisis,  $A_2$ , se elige las antenas números 1, 3, 5, 7 y 9 en las BS1 y BS2 y las antenas números 1, 3, 5, 7, 9 y 11 en la BS3, BS4, BS5, BS6 y BS7. Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Formado por 7 BS. Se trabaja en el escenario A,B,C,D,E,F y G. 40 antenas transmisoras x 3 antenas receptoras. Se elige las antenas 1, 3, 5, 7 y 9 . Análisis  $A_2$ . Esquemáticamente se representa como: HM-SDM-7BS-A,B,C,D,E,F,G-40X3-1,3,5,7,9- $A_2$

En el tercer análisis,  $A_3$ , se elige las antenas números 1, 3, 5, 7 y 9 en la BS1 y las antenas números 2,4,6,8 y 10 en la BS2, y las antenas números 1,3,5,7,9 y 11 en la BS3, BS5 y BS7, y las antenas números 2,4,6,8 y 10 en la BS4 y BS6. Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Formado por 7 BS. Se trabaja en el escenario A,B,C,D,E,F y G. 40 antenas transmisoras x 3 antenas receptoras. Se elige las antenas 1, 3, 5, 7 y 9 . Las antenas se van cambiando en las diferentes BS. Análisis  $A_3$ . Esquemáticamente se representa como: HM-SDM-7BS-A,B,C,D, E,F,G-40X3-1,3,5,7,9- $A_3$

5+5+6+6+6+6+6 antenas en transmisoras en BS.

SISTEMA	ANTENAS TRANSMISORAS	Correlación media
---------	----------------------	-------------------

HT-SDM-7BS-40X3								
HM-SDM-7BS-A,B,C,D, E,F,G-40X3-1,2,3,4,5-A1	1,2,3,4,5	1,2,3,4,5	1,2,3,4,5,6	1,2,3,4,5,6	1,2,3,4,5,6	1,2,3,4,5,6	1,2,3,4,5,6	0,19
	BS1	BS2	BS3	BS4	BS5	BS6	BS7	
HM-SDM-7BS-A,B,C,D, E,F,G-40X3-1,3,5,7,9-A2	1,3,5,7,9	1,3,5,7,9	1,3,5,7,9,11	1,3,5,7,9,11	1,3,5,7,9,11	1,3,5,7,9,11	1,3,5,7,9,11	0,1621
	BS1	BS2	BS3	BS4	BS5	BS6	BS7	
HM-SDM-7BS-A,B,C,D, E,F,G-40X3-1,3,5,7,9-A3	1,3,5,7,9	2,4,6,8,10	1,3,5,7,9,11	2,4,6,8,10	1,3,5,7,9,11	2,4,6,8,10	1,3,5,7,9,11	0,1654
	BS1	BS2	BS3	BS4	BS5	BS6	BS7	

Tabla 3-17. Antenas elegidas. HM-SDM-7BS-40X3.

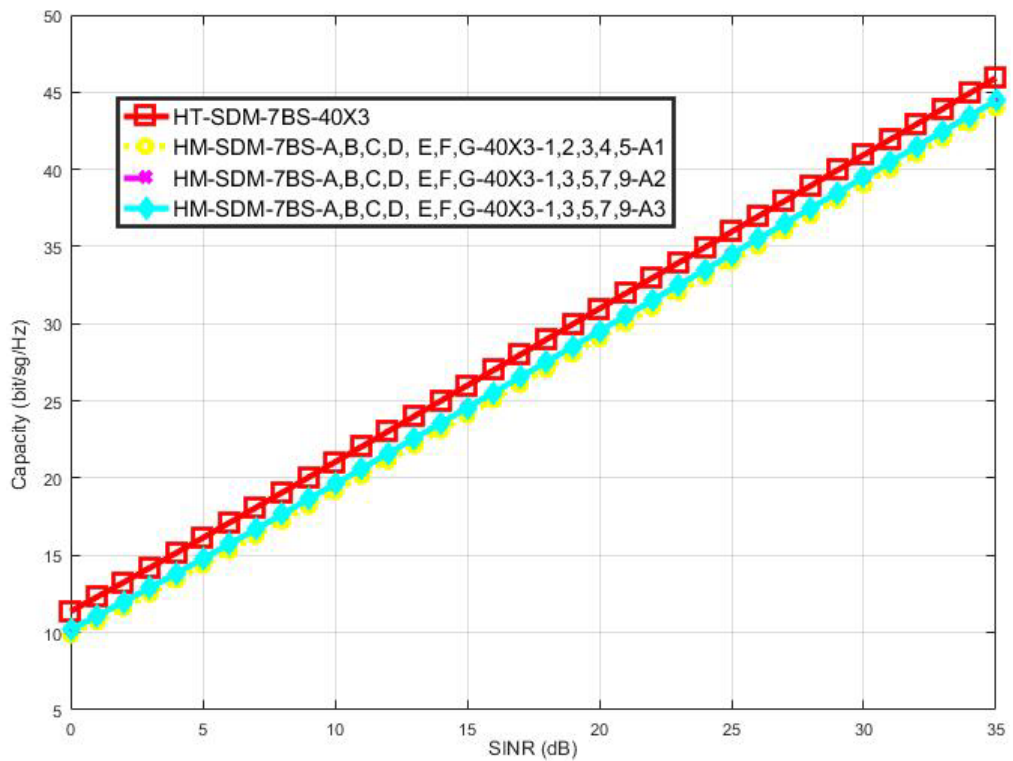


Figura 3-20. Gráfica resultados de capacidad. HM-SDM-7BS-40X3.

La capacidad del sistema A1 y de sistema A2 son iguales. La capacidad del sistema A3 mejora un poco.

Al ser muchas BS el sistema no depende de la correlación de las antenas y no tiene más o menos capacidad un sistema en función del valor de correlación.

Lógicamente este es el caso con mayores capacidades, el que usa más BS y mayor número de antenas.

3.6.2 Sistema formado por 4 BS.

Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Formado por 4 BS. 40 antenas transmisoras x 3 antenas receptoras. Esquemáticamente se representa como: HM-SDM-4BS-40X30

En este caso se toma 40 antenas distribuidas en 4 BS: 12 antenas transmisoras en 3 BS y 4 antenas transmisoras en una BS.

De las diferentes antenas elegidas, tenemos 3 casos posibles.

En el primer análisis, B1, se elige las antenas números 1, ..,12, en las BS1, BS2, BS3 y las antenas 1, 2, 3 y 4 en la BS4. Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Formado por 4 BS. Se trabaja en el escenario A,B,C y D. 40 antenas transmisoras x 3 antenas receptoras. se elige las antenas números 1...., 12. Análisis B1. Esquemáticamente se representa como: HM-SDM-4BS-A,B,C,D-40X3-1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12-B1

En el segundo análisis, B2, se elige las antenas números 1...., 12 en las BS4, BS5 y BS6 y las antenas 1, 2, 3 y 4 en la BS7. Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Formado por 4 BS. Se trabaja en el escenario D,E,F y G. 40 antenas transmisoras x 3 antenas receptoras. Se elige las antenas 1...., 12.. Análisis B2. Esquemáticamente se representa como: HM-SDM-4BS-D,E,F,G-40X3-1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12-B2

En el tercer análisis, B3, se elige las antenas números 1...., 12 en las BS4, BS5 y BS6 y las antenas 1, 5, 9 y 11 en la BS7. Se analiza un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Formado por 4 BS. Se trabaja en el escenario D,E,F y G. 40 antenas transmisoras x 3 antenas receptoras. Se elige las antenas 1...., 12.. Análisis B3. Esquemáticamente se representa como: HM-SDM-4BS-D,E,F,G-40X3-1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12-B3

12+12+12+4 antenas en transmisoras en BS.

SISTEMA	ANTENAS TRANSMISORAS				Correlación media
HT-SDM-4BS-40X3					
HM-SDM-4BS-A,B,C,D-40X3-1,....12-B1	1, ....., 12	1, ....., 12	1, ....., 12	1,2,3,4	0,38
	BS1	BS2	BS3	BS4	
HM-SDM-4BS-D,E,F,G-40X3-1,....12-B2	1, ....., 12	1, ....., 12	1, ....., 12	1,2,3,4	0,195
	BS4	BS5	BS6	BS7	
HM-SDM-4BS-D,E,F,G-40X3-1,....12-B3	1, ....., 12	1, ....., 12	1, ....., 12	1,5,9,11	0,23
	BS4	BS5	BS6	BS7	

**Tabla 3-18. Antenas elegidas. HM-SDM-4BS-40X3.**

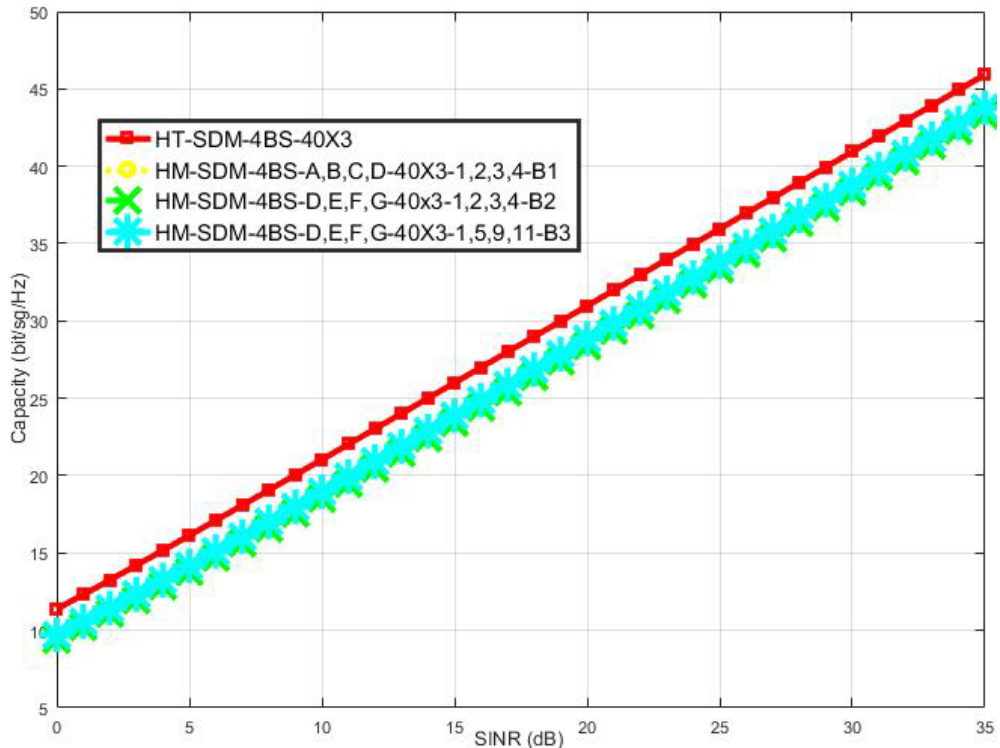


Figura 3-21. Gráfica resultados de capacidad. HM-SDM-4BS-40X30.

El sistema B1 tiene la misma capacidad que el sistema B2.

Sistema B3 mejora muy un poco.

No hay relación con la correlación.

Éste es otro caso en que las correlaciones medias engañan, debido a los valores de pico que hacen aumentar las correlaciones medias, aunque la mayoría de las antenas no estén correladas.

Las antenas de las BS7 están muy correladas y es como si no estuviera más que una. Esto hace que las correlaciones medias no estén relacionadas con la capacidad.

La capacidad total del sistema no mejora respecto al caso anterior. Al usar 40 antenas, no influye apenas que usemos 4 BS o 7 BS.

### 3.7 Conclusiones

En este análisis realizo un primer estudio que consiste en representar gráficamente la capacidad de diferentes sistemas DMIMO, en los que se varía el número de antenas totales 5, 7, 10, 20, 40, y para cada este número de antenas se cambia el número de BS elegidas, desde 1 BS a 7 BS el máximo. En cada análisis también se varia la localización de las antenas elegidas, dentro del mismo número total de antenas. Para todos estos casos calculo la capacidad, en función de la SINR, y la correlación del sistema, y analizo qué parámetro influye más en la capacidad. Todo esto se representa gráficamente en los diferentes apartados.

Para analizar de manera global los resultados de los apartados anteriores se estudia el valor de la capacidad para una SINR concreta, 30 dB. En la siguiente tabla 3.19, se presenta los valores de la capacidad en cada caso en función del número de antenas elegidas en transmisión x recepción, y para cada caso, en función del número de BS elegidas. Se incluye en el análisis el valor medio de correlación. Se estudia un solo valor de la capacidad para un punto concreto de SINR porque de la observación de las gráficas se deduce que la capacidad en los diferentes escenarios se comporta de la misma forma con la SINR, y con tomar un solo punto puede ser suficientemente aclaratorio.

Nº de antenas	nº de BS	CAPACIDAD (SINR=30 dB)	correlación
<b>5X3</b>	5	29	.15
	3	29	.15
	2	28	.26
	1	25	.7
<b>7X3</b>	7	31.5	.1
	4	31	.1
	3	30	.16
	1	27	.7
<b>10X3</b>	7	34.5	.15
	5	34	.2
	2	31	.3
	1	31	.6
<b>20X3</b>	7	38	.18
	5	38	.2
	2	34	.35
<b>40X3</b>	7	39.5	.17
	4	39	.2

**Tabla 3-19. conclusiones**

Se observa analizando la tabla 3.19, que la capacidad es mayor, cuanto mayor es el número de antenas elegidas, y dentro de cada número de antenas elegidas, cuanto mayor es el número de BS entre las que se distribuyan las antenas, mayor es la capacidad. Aunque este parámetro del número de BS elegidas no hace aumentar tanto la capacidad como el número de antenas. También se observa que una vez fijado el número de antenas, cuanto mayor es el número de BS entre las que se distribuyen las antenas, menor es la correlación, lo cual también es lógico, ya que al ser los sistemas DMIMO con más BS, menos correlados serán y mayor la capacidad.

No obstante, en este análisis se ha trabajado con correlaciones medias y en cada análisis se ha obtenido la correlación para cada variación de antenas elegidas, y se observa que en general cuanto menos correlado es el sistema, mayor capacidad presenta, aunque las diferencias dentro de cada análisis, en los que se ha variado las antenas elegidas, para ver cómo influye la correlación, se observa que las variaciones de capacidad son pequeñas.

En cada sistema definido por el número de antenas elegidas, se observa que cuando el número de BS elegidas es grande, en general las correlaciones son pequeñas y no



aumenta linealmente la capacidad del sistemas en función del valor de correlación, es decir no presenta mayor capacidad, necesariamente, el sistema con menor correlación, en cambio cuando el número de BS elegidas es pequeño, las correlaciones son mayores, y los sistemas siguen de una forma más lineal que los sistemas menos correlados son los que tienen mayor capacidad.

## 4. SISTEMAS MIMO DISTRIBUIDOS MASIVOS DE POTENCIA VARIABLE

### 4.1 Introducción

En este análisis se sigue trabajando con sistemas MIMO Distribuidos. Se analiza el caso de diferentes ganancias de potencia en cada BS. Se realiza el estudio considerando que las señales que llegan a las diferentes BS están desbalanceadas en potencia, ya que unas estarán más alejadas que otras, y los caminos de propagación no serán los mismos en la realidad.

Se trata de ver los mismos casos que en el análisis anterior, pero viendo la influencia de si las BS están más o menos separadas del equipamiento de usuario. Para simular este caso se realizará una variación de la potencia recibida en las diferentes BS, y a partir de esos datos se analizará la capacidad del sistema.

Para ello se parte en este análisis de los datos obtenidos en las medidas realizadas en la cámara de reverberación descritos en el capítulo anterior.

El objetivo es analizar cuando deja de tener sentido por capacidad coger estaciones base que estén más lejos. En el análisis del punto anterior, se realizó el estudio considerando que todas las BS que tienen la misma potencia. Ahora les vamos a cambiar la potencia a una o dos BS dependiendo del análisis realizado, de las 7 posibles. Se analizará la capacidad de los sistemas, en función de lo igualadas que estén las potencias que emiten las diferentes BS que estén implicadas en el sistema. Se analizará si influye en la capacidad del sistema que unas BS emitan potencias muy superiores o inferiores al resto de las BS. De una forma simple, se estudia cómo influye el desbalanceo de potencia entre las diferentes BS.

También se analizará el grado de correlación de los sistemas en función de las BS elegidas, y las antenas dentro de cada BS, para estudiar el comportamiento combinado de la correlación con el balanceo de potencia.

Para repetir los trabajos anteriores, pero variando la potencia de emitida por cada BS, lo que se realiza es al revés, se atenúa la señal que emite cada BS y con ello se simula que la BS está más alejada del receptor, y se calcula la capacidad del sistema, para analizar el que una BS está más o menos alejada del receptor, y el efecto del desbalanceado de potencia entre las diferentes BS que emiten la señal al mismo tiempo. Así mismo, se estudia cuando deja de tener sentido, analizando la capacidad, coger estaciones que estén más lejos.

Para calcular matemáticamente el balanceo de potencia de las BS que componen el sistema, se calcula la varianza y la desviación típica de las potencias emitidas en cada BS para cada valor de los atenuadores.

Todas las potencias de emisión de cada una de las BS están normalizadas, de forma que la que emite mayor potencia es la BS del escenario A, que emite con potencia normalizada 1 y la que emite con menor potencia es la BS del escenario G.

Este concepto debe ser tenido en cuenta al ir variando la potencia de emisión de las diferentes BS en cada uno de los análisis, ya que si atenúo la señal de una BS que emite muy poca potencia es previsible que afecte menos a la capacidad que si atenúo la señal de una BS que emita mucha potencia.

De esta forma se tiene que tener en cuenta qué BS se atenúa o varía en la potencia emitida, y dentro de cada BS elegida, cómo puede afectar las antenas que se eligen.

Los valores de potencia normalizadas de cada una de las antenas de cada BS se reflejan en la siguiente tabla 4.1.

**POTENCIA EMITIDA POR CADA ANTENA DE CADA BS**

ANTENA DE CADA ESTACION BASE												
ESTACION BASE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1 (ESCENARIO A)	0.9920	1	0.9892	0.9709	0.9454	0.9170	0.9069	0.8962	0.8948	0.8968	0.9017	0.9112
2 (ESCENARIO B)	0.5619	0.5526	0.5289	0.4952	0.4609	0.4299	0.4102	0.4011	0.3962	0.3977	0.4039	0.4032
3 (ESCENARIO C)	0.4131	0.4118	0.3996	0.3810	0.3558	0.3377	0.3227	0.3125	0.3060	0.3024	0.2987	0.2936
4 (ESCENARIO D)	0.7726	0.7912	0.8098	0.8212	0.8290	0.8299	0.8281	0.8189	0.7931	0.7812	0.7714	0.7649
5 (ESCENARIO E)	0.5712	0.5718	0.5691	0.5661	0.5626	0.5586	0.5543	0.5453	0.5399	0.5289	0.5186	0.5131
6 (ESCENARIO F)	0.1518	0.1541	0.1535	0.1518	0.1486	0.1468	0.1451	0.1434	0.1441	0.1451	0.1464	0.1474
7 (ESCENARIO G)	0.1454	0.1431	0.1394	0.1368	0.1334	0.1297	0.1258	0.1223	0.1195	0.1179	0.1155	0.1135

**Tabla 4-1. Valores de potencia normalizada de cada antena, de cada BS.**

Así mismo la potencia media emitida por cada BS, obtenida del valor medio de cada una de las potencias emitidas de cada antena lo tenemos en la siguiente tabla 4.2:

**POTENCIA MEDIA EMITIDA POR CADA BS**

ESTACION BASE	
1 (ESCENARIO A)	1
2 (ESCENARIO B)	0.4849
3 (ESCENARIO C)	0.3685
4 (ESCENARIO D)	0.8565

5 (ESCENARIO E)	0.5881
6 (ESCENARIO F)	0.1584
7 (ESCENARIO G)	0.1374

**Tabla 4-2. Valor medio de potencia normalizada emitida por cada BS.**

Los transmisores son las BS, que disponemos de 7 diferentes, equipadas cada una con 12 antenas. El receptor es un equipo móvil equipado con 3 antenas receptoras que utiliza siempre.

En lugar de analizar la capacidad para 36 valores diferentes de relación SINR, se ha analizado para 5 valores de la relación SINR y en este documento solo se incluye el valor medio (SINR=15), ya que en los análisis se comprobó que el comportamiento era similar para varios valores de SINR.

En los sistemas, solo se atenúa la señal que emiten 2 BS, y se estudia que ocurre cuando se atenúa una BS con respecto a otra. Es decir, se aleja una BS, y para cada valor de esa atenuación, se aleja un poco más otra BS. Para atenuar la señal que llega a cada BS se usan dos atenuadores definidos por las variables pot1 y pot2. Las dos variables varían en pasos de 0,2 desde 0,01 a 1. Para cada posición de pot1, la variable pot2 recorre todas sus posiciones.

Se realizarán 3 análisis diferentes, uno formado por 5 antenas transmisoras distribuidas en 5 BS y 3 antenas receptoras en equipo móvil de usuario. Otro formado por 5 antenas transmisoras distribuidas en 3 BS y 3 antenas receptoras y el tercer análisis formado por 10 antenas transmisoras distribuidas en 5 BS y 3 antenas receptoras.

Para cada uno de los 3 análisis anteriores se realizan diferentes análisis en los que se varían las BS elegidas, y las antenas dentro de las BS, así mismo se varían las BS que se deciden atenuar con los atenuadores pot1 y pot2, para estudiar cómo varía la capacidad según se atenúa una u otra BS.

En el análisis de 5x3, primero se realiza un estudio en el que solo se atenúa una BS, para ver cómo influye en la capacidad en el hecho de que una BS se aleje del receptor. Posteriormente se atenúan 2 BS, para ver cómo influye el que se alejen 2 BS del receptor.

#### **4.2 Sistema DMIMO de potencia variable 5x3 en 5 BS**

Se tendrá una antena transmisora en cada BS. Se analizan 7 sistemas DMIMO, que llamo A1, A2, A3, A4, A5, A6 y A7 en lo que se eligen diferentes BS y número de antenas dentro de las BS, y se estudiará cómo afecta a la capacidad el número de BS y antenas elegidas, y las BS elegidas para atenuar.

Los sistemas A1 y A2 son en los que solo se atenúa una BS. El resto de los sistemas se atenúan 2 BS.

En este análisis se atenuarán diferentes BS, y dentro de cada BS elegida, se variarán las antenas elegidas, para analizar la capacidad de cada caso.

4.2.1 Análisis sistema A1

El sistema se nombrará como HM-SDM-PV-A,B,C,D,E,F-5BS-5X3-1-A1. Indica un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Análisis variando la potencia, PV. Formado por 5 BS. Se trabaja en el escenario A,B,C,D,E y F. 5 antenas transmisoras x 3 antenas receptoras. Se elige la antena 1. Análisis A1.

En este sistema se atenúa solamente una de las BS, para comprobar de forma más clara que los sistemas mejoran su capacidad cuando en los sistemas DMIMO la potencia que emiten las diferentes BS están balanceadas. Se elige en todas las BS la misma antena, por simplicidad.

Las antenas elegidas y las BS se muestran en la tabla 4.3.

ANTENAS TRANSMISORAS	1	1	1	1	1
	BS1	BS2	BS3	BS4	BS5

Tabla 4-3. Antenas elegidas caso: HM-SDM-PV-A,B,C,D,E,F-5BS-5X3-1-A1

Se atenúa la BS1 que es el escenario A en 5 valores diferentes regulados por pot1. Los resultados pueden verse en la figura 4.1, siguiente.

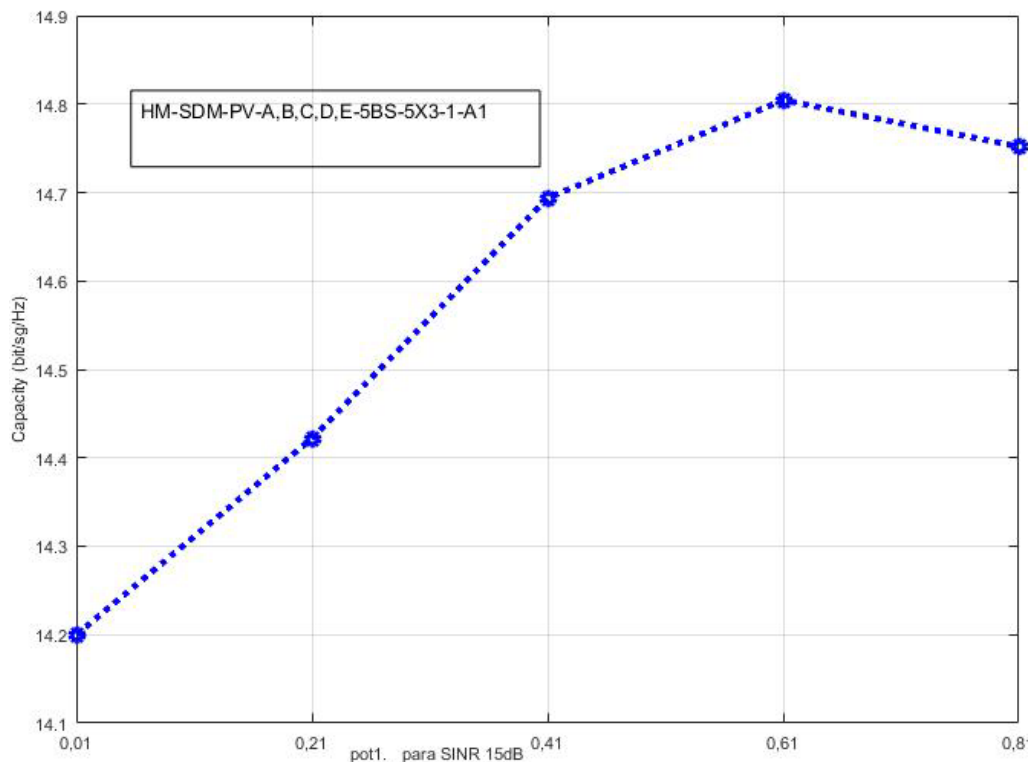


Figura 4-1. Gráfica resultados de capacidad. HM-SDM-PV-A,B,C,D,E-5BS-5X3-1-A1

En la figura 4.1 se observa que , el máximo de capacidad se obtiene para una atenuación de 0.61 para el escenario A (BS1). Cuando la atenuación de la BS1 es 0.61,

está más al nivel medio de las potencias de las otras BS ya que es la estación base que más potencia emite.

En la siguiente tabla, número 4.4, se detallan los valores de potencia emitida de cada una de las BS usadas en el sistema DMIMO, para cada valor del atenuador pot1. También se presentan para esos valores la varianza y la desviación típica de la potencia que nos indicará el balanceado de potencia.

POTENCIAS RECIBIDAS DE CADA BS	VALORES DEL ATENUADOR				
	0,01	0,21	0,41	0,61	0,81
BS1	0,0099	0,2083	0,4067	0,6051	0,8035
BS2	0,5619	0,5619	0,5619	0,5619	0,5619
BS3	0,4131	0,4131	0,4131	0,4131	0,4131
BS4	0,7726	0,7726	0,7726	0,7726	0,7726
BS5	0,5712	0,5712	0,5712	0,5712	0,5712
VARIANZA	0,08127317	0,04392636	0,02232457	0,0164678	0,02635605
DESVIACIÓN ESTANDAR	0,25498733	0,18745956	0,13364001	0,11477908	0,14520621

**Tabla 4-4. Potencias emitidas por cada BS en función del atenuador pot1.**

Se observa como para el valor del atenuador en 0.61, el valor de la varianza y la desviación típica, obtiene su valor mínimo, que es justo cuando la capacidad tiene su valor máximo. También es observable que para valores entre (0.01 y 0.61) la capacidad aumenta con la atenuación, al tiempo que la varianza y la desviación típica disminuyen. Esto nos indica que cuanto más balanceado en potencia estén el sistema mayor será la capacidad.

#### 4.2.2 Análisis sistema A2

El sistema se nombrará como HM-SDM-PV-A,B,C,D,E-5BS-5X3-1-A2. Indica un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Análisis variando la potencia, PV. Formado por 5 BS. Se trabaja en el escenario A,B,C,D,E. 5 antenas transmisoras x 3 antenas receptoras. Se elige la antena 1. Análisis A2.

En este caso se prueba a atenuar solo BS2, para comprobar los resultados.

ANTENAS RECEPTORAS	1	1	1	1	1
	BS1	BS2	BS3	BS4	BS5

**Tabla 4-5. Antenas elegidas caso: HM-SDM-PV-A,B,C,D,E,F-5BS-3X5-1-A2**

Se atenúa: BS2 (ESCENARIO B) con pot1

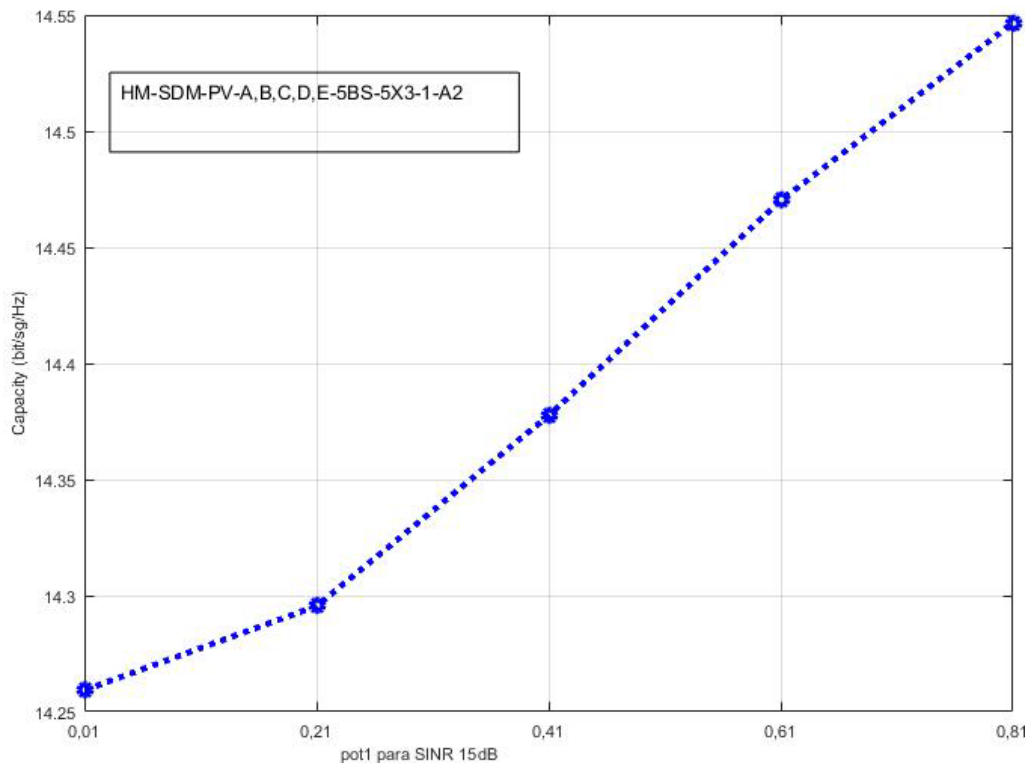


Figura 4-2. Gráfica resultados de capacidad. HM-SDM-PV-A,B,C,D,E-5BS-5X3-1-A2

En este caso, se observa en la figura 4.2, que como no es BS1 la que se atenúa, sale un valor lógico, que cuanto menos se atenúe la señal, mayor capacidad.

En la siguiente tabla 4.5, se detallan los valores de potencia recibida de cada una de las BS usadas en el sistema DMIMO, para cada valor del atenuador pot1.

POTENCIAS RECIBIDAS DE CADA BS	VALORES DEL ATENUADOR				
	0,01	0,21	0,41	0,61	0,81
BS1	0,992	0,992	0,992	0,992	0,992
BS2	0,005619	0,117999	0,230379	0,342759	0,455139
BS3	0,4131	0,4131	0,4131	0,4131	0,4131
BS4	0,7726	0,7726	0,7726	0,7726	0,7726
BS5	0,5712	0,5712	0,5712	0,5712	0,5712
VARIANZA	0,1401131	0,1119994	0,08893741	0,07092712	0,05796853
DESVIACIÓN ESTANDAD	0,33479916	0,29933179	0,26673943	0,23820515	0,21534815

**Tabla 4-6. Potencias emitidas por cada BS en función del atenuador pot1.**

Se observa como para el valor del atenuador en 0.81 el valor de la varianza obtiene su valor mínimo, que es justo cuando la capacidad tiene su valor máximo, al igual que la varianza y la desviación típica.

#### 4.2.3 Análisis sistema A3

El sistema se nombrará como HM-SDM-PV-A,B,C,D,E-5BS-5X3-1-A3.

Indica un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Análisis variando la potencia, PV. Formado por 5 BS. Se trabaja en el escenario A,B,C,D,E. 5 antenas transmisoras x 3 antenas receptoras. Se elige la antenna 1. Análisis A3.

En este análisis se atenúan dos BS, con dos atenuadores, pot1 y pot2, cada BS.

Sistema DMIMO formado por 5 BS, cada una de los 5 escenarios A, B, C, D y E. se toma la antenna número 1 de cada BS.

ANTENAS RECEPTORAS	1	1	1	1	1
	BS1	BS2	BS3	BS4	BS5

**Tabla 4-7. Antenas elegidas caso:HM-SDM-PV-A,B,C,D,E-5BS-5X3-1-A3**

Correlación media: 0,3148.

Se atenúa: BS1 (ESCENARIO A) con pot1; pot1=0.01:0.2:1  
 BS2 (ESCENARIO B) con pot2; pot2=0.01:0.2:1

En la figura 4.3, en el eje de ordenadas, atenuado con el pot2, se representa los valores que multiplican la señal recibida en la BS2 (ESCENARIO B), valores de 0,01- 0,21- 0,41 - 0,61- 0,81, conforme el atenuador se multiplica por un valor mayor, es lo mismo que atenuar menos. Se observa por el color de las líneas que cuanto mayor es el valor de pot2, mayor es la capacidad del sistema.

Para cada uno de estos valores de señal recibida, se obtiene la capacidad en los mismos 5 valores de la señal atenuada en la BS1, (ESCENARIO A).

De forma que la línea roja representa la capacidad del sistema cuando BS2 está atenuada con pot2=0,01. Conforme la BS1 está multiplicada por valores mayores, la capacidad va subiendo, que son el resto de las líneas de colores. Al ir multiplicando BS1 por valores mayores del atenuador ps1, lo normal es que la capacidad siguiera subiendo también, pero su valor máximo lo obtiene para pot1= 0,61. Ello es debido a que las potencias del sistema están más igualadas en potencia para cuando pot1=0,61, es decir, el sistema está más balanceado en potencia.



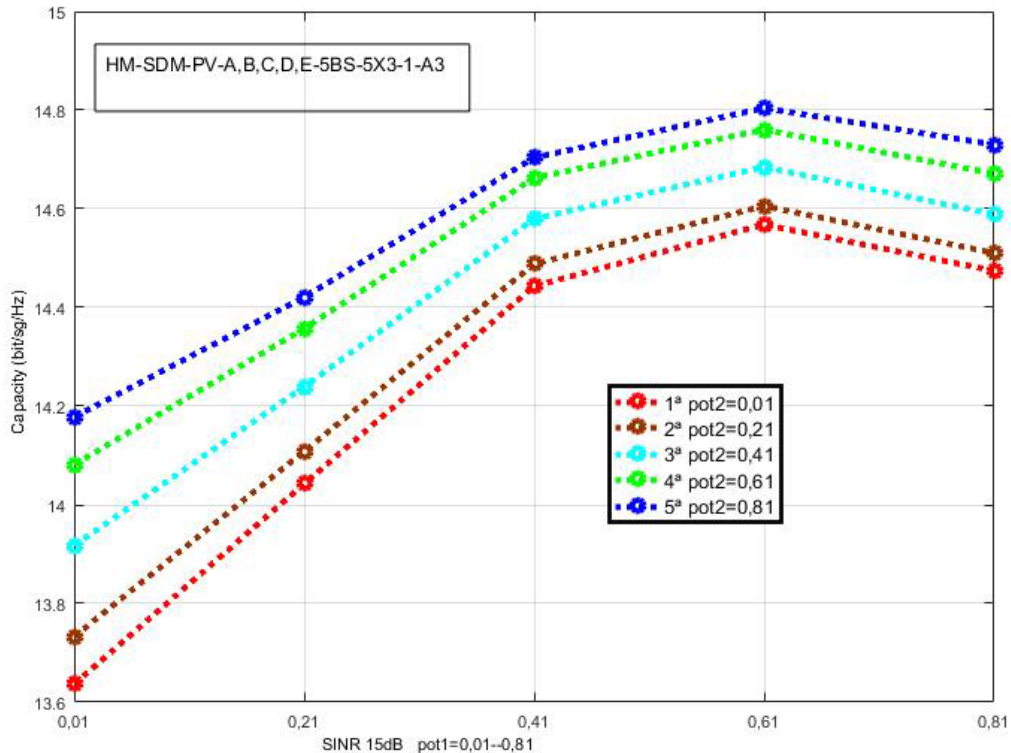


Figura 4-3. Gráfica resultados de capacidad. HM-SDM-PV-A,B,C,D,E-5BS-5X3-1-A3

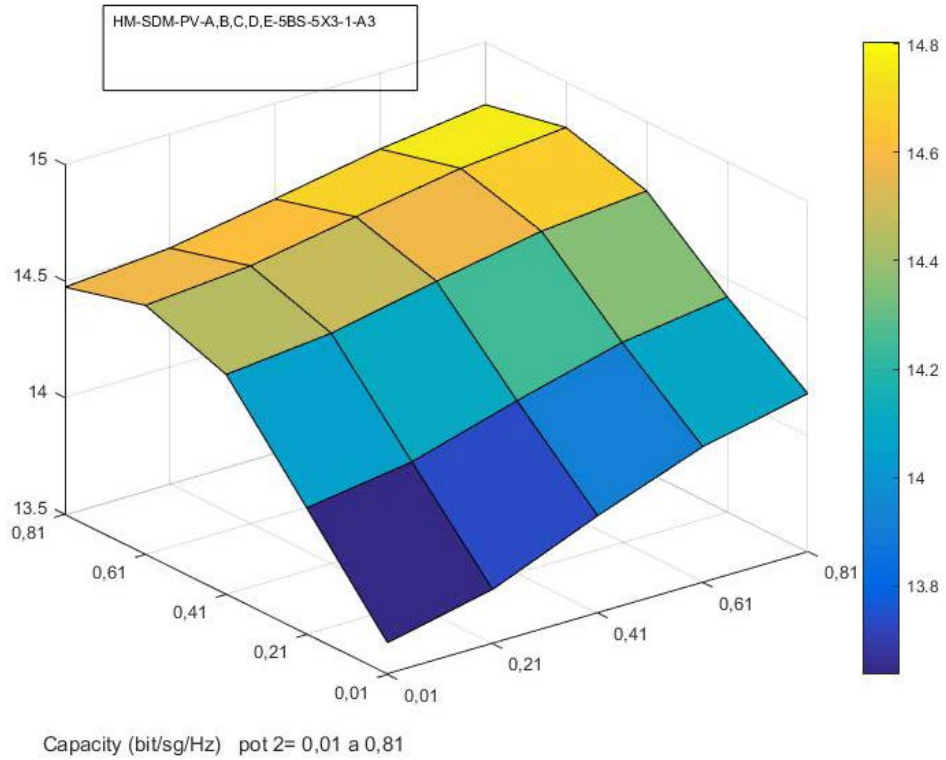
Se observa que al ir dejando de atenuar tanto BS1 como B2, para las diferentes SINR la capacidad va aumentando, lo cual es lógico, hasta, como se ha comentado anteriormente, para el valor de  $\text{pot1}=0,61$ , que es el valor en el cual las potencias de todas las BS elegidas, son más parecidas.

No obstante, en la atenuación de la BS1 a 0,61, (punto 4 en la figura 4.3, eje de abscisas), es cuando se obtiene la mayor capacidad, para los diferentes valores de atenuación de la BS1. Se esperaría que la capacidad obtuviera su valor máximo para la atenuación mínima de las BS, es decir que la curva fuera creciente siempre, en lugar de tener un máximo en el punto 4 de eje x.

Así mismo, al atenuar BS1 con  $\text{pot1}$ , se observa que cuando está atenuado multiplicado por 0,61, mayor es la capacidad, ya que la BS1 es la que emite más potencia, luego al atenuarla más, las dos BS emiten potencias más parecidas, es decir, el sistema está más compensado y la capacidad es mayor.

Se hace representación gráfica en 3 dimensiones, en la que se aprecia mejor la curvatura del máximo de capacidad alrededor de la atenuación de 0,61. Se representa en la figura 4.4.

GRÁFICAS EN 3D PARA SINR=15 dB.  
ESTUDIO A3. SISTEMA (5X3)



**Figura 4-4. Gráfica resultados de capacidad. HM-SDM-PV-A,B,C,D,E-5BS-5X3-1-A3-3D**

Se realiza un estudio más detallado de mismo análisis.

La atenuación varía desde 0,3 a 1 en pasos de 0,1, buscando los valores que más afectan.

Se atenúa: BS1 (ESCENARIO A) con pot1;                      pot1=0.3:0.1:1  
 BS2 ESCENARIO B) con pot2;                                      pot2=0.3:0.1:1

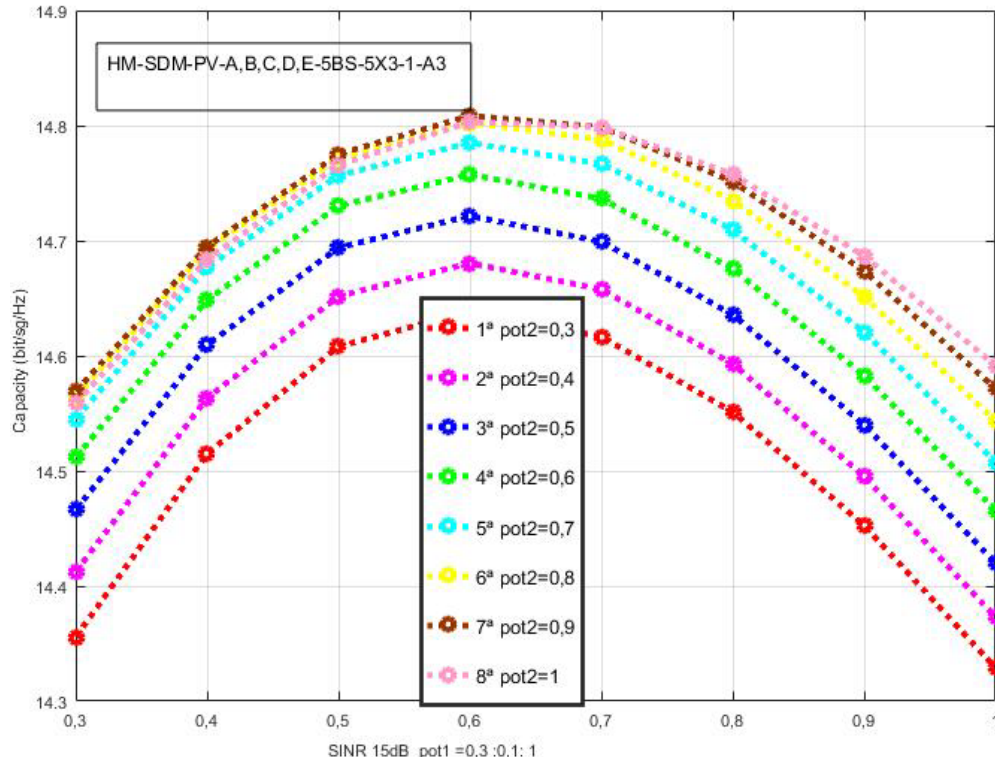


Figura 4-5. Gráfica resultados de capacidad. HM-SDM-PV-A,B,C,D,E-5BS-5X3-1-A3-detail

Se aprecia, la figura 4.5, para qué valores de la atenuación de pot1, se produce el máximo, al igual que en el gráfico anterior, pero más detallado. Lógicamente, no ocurre exactamente en los valores del atenuador pot1=0,61, si no que oscila entre 0,5 y 0,7.

En la tabla 4.8 se presentan las varianzas que se obtienen de los valores de potencia recibida por cada BS del sistema DMIMO analizado para cada valor de los atenuadores pot1 y pot2.

Se observa en la tabla, que para cada valor de pot2, que correspondería a una línea de color en la gráfica anterior, número 1, las varianzas van disminuyendo, lo que hace que las capacidades vayan aumentando, hasta que el valor de pot1 está en 0,61, en que las varianzas vuelven a aumentar, y por ello la gráfica número 1 hace la curva y disminuye.

Así mismo, para cada valor de pot1, se observa que las varianzas aumentan para cuando pot2 disminuye, por ello las capacidades aumentan cuando pot2 disminuye, que son los diferentes colores de la figura 4.5.

En la tabla 4.8, **los valores de pot2 en negrita**. Los valores de pot1 subrayados.

En estas tablas, no se presenta los valores de potencia recibidas en cada BS ya que saldrían 5 matrices de 5x5 en lugar de una matriz de 5x5, y tal número de datos, más que aclarar, se entiende que daría lugar a oscurecer la información que contienen. Por ello solo se presenta el valor de varianza para cada valor del atenuador, y sobre la matriz de varianza se ha obtenido las conclusiones.

<b>Pot2=</b>					
<b>0,01</b>	0,116	0,090	0,080	0,085	0,106
<b>0,21</b>	0,099	0,071	0,058	0,061	0,080
<b>0,41</b>	0,087	0,057	0,042	0,042	0,059
<b>0,61</b>	0,080	0,047	0,030	0,029	0,043
<b>0,81</b>	0,078	0,043	0,024	0,020	0,032
<u>Pot1=</u>	<u>0,01</u>	<u>0,21</u>	<u>0,41</u>	<u>0,61</u>	<u>0,81</u>

**Tabla 4-8. Varianzas para el análisis: HM-SDM-PV-A,B,C,D,E-5BS-5X3-1-A3**

4.2.4 Análisis sistema A4

El sistema se nombrará como HM-SDM-PV-A,B,C,D,E-5BS-5X3-1-A4  
 Indica un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM.  
 Análisis variando la potencia, PV. Formado por 5 BS. Se trabaja en el escenario A,B,C,D,E. 5 antenas transmisoras x 3 antenas receptoras. Se elige la antena 1.  
 Análisis A4.

Se cambia las BS que se atenúan, una por otra. Se cambia la atenuación de BS1 por BS2, y se repite el estudio de la capacidad.

ANTENAS RECEPTORAS	1	1	1	1	1
	BS1	BS2	BS3	BS4	BS5

**Tabla 4-9. Antenas elegidas caso: HM-SDM-PV-A,B,C,D,E-5BS-5X3-1-A4**

Correlación media: 0,3148

Se atenúa: BS1 (ESCENARIO A) con pot2;  
 BS2 (ESCENARIO B) con pot1;

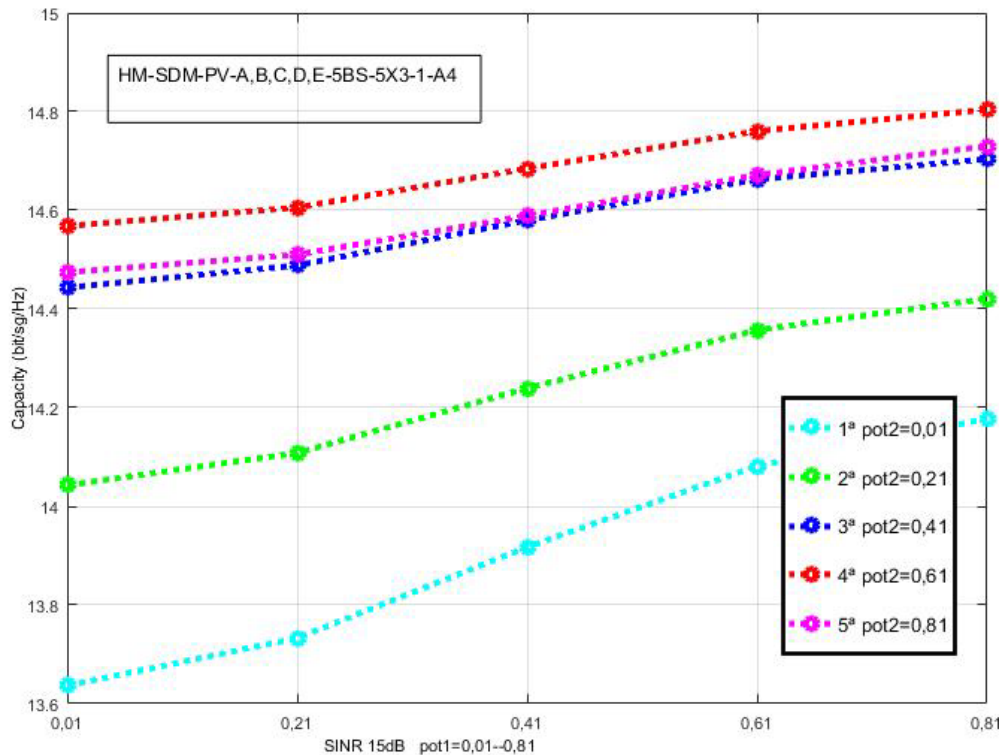


Figura 4-6. Gráfica resultados de capacidad. HM-SDM-PV-A,B,C,D,E-5BS-5X3-1-A4

Comparando con el mismo caso del estudio anterior, sistema A3, se observa en la figura 4.6, que desaparece el punto de inflexión sobre pot1 en 0,6 aproximadamente que existe en la figura 4.6 de A1 sin modificar.

Es como si la BS2 (absorbentes) influye más en la capacidad total del sistema, ya que al dejar de atenuar BS2 con pot1, el incremento de capacidad es lineal y pequeña.

En el caso del atenuador pot2, que atenúa BS1, que es la BS que recibe más potencia, se observa que la capacidad es máxima para la línea roja, que corresponde a una atenuación de pot2=0,61, que es el caso en el que las potencias están más balanceadas. La línea roja que se produce para pot2=0,61 es la que tiene menos varianza, y ello se traduce en mayor capacidad, que s

En la tabla 4.10, **los valores de pot2 en negrita**. Los valores de pot1 subrayados.

Pot2=					
<b>0,01</b>	0,116	0,099	0,087	0,080	0,078
<b>0,21</b>	0,090	0,071	0,057	0,047	0,043
<b>0,41</b>	0,080	0,058	0,042	0,030	0,024
<b>0,61</b>	0,085	0,061	0,042	0,029	0,020
<b>0,81</b>	0,106	0,080	0,059	0,043	0,032
<u>Pot1=</u>	<u>0,01</u>	<u>0,21</u>	<u>0,41</u>	<u>0,61</u>	<u>0,81</u>

Tabla 4-10. Varianzas para el análisis: HM-SDM-PV-A,B,C,D,E-5BS-5X3-1-A4

De la tabla número 4.10 se observa que las varianzas disminuyen conforme aumenta el atenuador pot1, por ello las gráficas de la figura 4.6 aumentan linealmente con el aumento de pot1. Las líneas roja, rosa y azul, están juntas, que ocurre para los valores de pot2 a partir de 0,41, que confirma con el echo que las varianzas son parecidas, aunque la varianza menor es para pot2=0, 61, que corresponde con la línea roja.

#### 4.2.5 Análisis sistema A5

El sistema se nombrará como HM-SDM-PV-C,D,E,F,G-5BS-5X3-1,12-A5. Indica un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Análisis variando la potencia, PV. Formado por 5 BS. Se trabaja en el escenario - C,D,E,F,G. 5 antenas transmisoras x 3 antenas receptoras. Se elige la antena 1 y la 12. Análisis A5.

Se cambian las BS elegidas y las antenas dentro de las BS y se hace un nuevo estudio. En este caso se eligen las BS3 y BS4 para atenuar y se eligen el resto de las BS, que reciben menos potencia.

ANTENAS RECEPTORAS	1	12	1	12	1
	BS3	BS4	BS5	BS6	BS7

**Tabla 4-11. Antenas elegidas caso: HM-SDM-PV-C,D,E,F,G-5BS-5X3-1,12-A5**

Correlación media: 0,467

Se atenúa: BS3 (ESCENARIO C), con pot1;  
 BS4 (ESCENARIO D), con pot2,

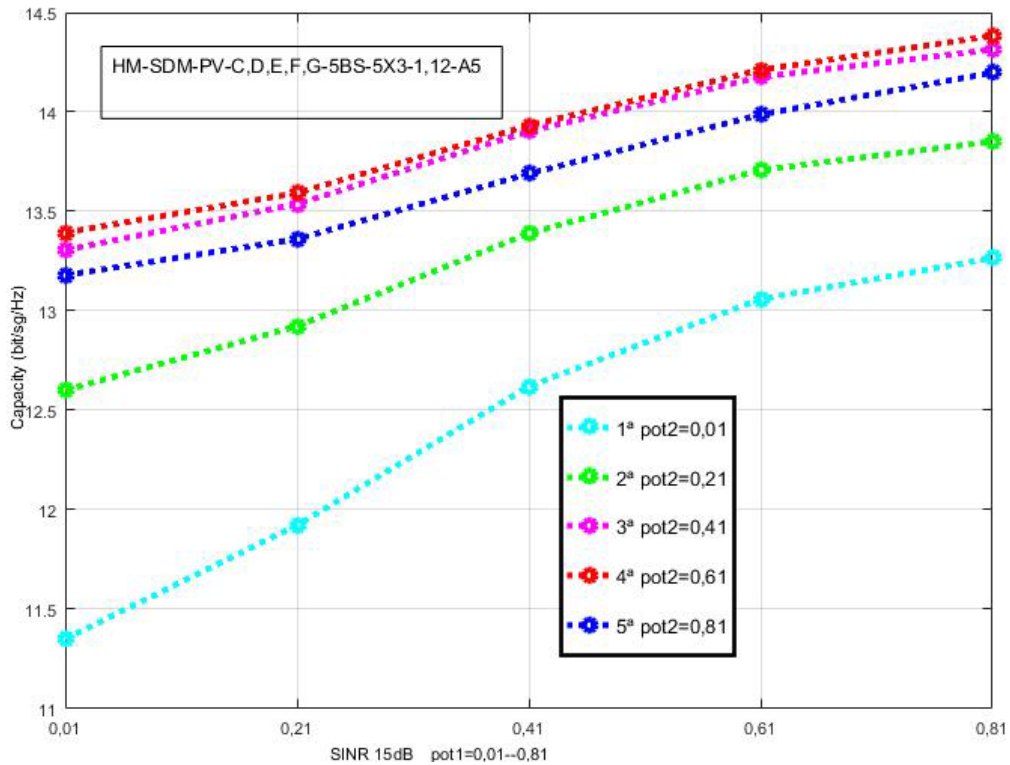


Figura 4-7. Gráfica resultados de capacidad. HM-SDM-PV-C,D,E,F,G-5BS-5X3-1,12-A5

En este caso, observando la figura 4.7, en que las BS utilizadas son de la 3 a la 7, no se coge la cámara vacía. Al ir disminuyendo la atenuación de BS3 con pot1, todos los sistemas aumentan su capacidad. La antena 12 de BS4 tiene casi el doble de potencia que la antena 1 de BS3, por ello cuando BS4 está atenuado con 0,41 ó 0,61 es cuando los sistemas tienen la capacidad máxima, ya que es cuando las BS tienen una potencia parecida. Las BS6 y BS7 son las que menos potencia reciben, de forma que, si el resto de las BS reciben mucha potencia, el sistema se desbalancea y, en consecuencia, la capacidad del sistema es menor.

Notar que la correlación es elevada, y la capacidad de todos los casos es menor que los casos anteriores con el mismo número de antenas y de BS.

En la tabla 4.12, los valores de pot2 en **negrita**. Los valores de pot1 subrayados.

Pot2=					
<b>0,01</b>	0,054	0,046	0,047	0,058	0,078
<b>0,21</b>	0,048	0,039	0,039	0,048	0,067
<b>0,41</b>	0,045	0,035	0,033	0,041	0,059
<b>0,61</b>	0,045	0,033	0,031	0,037	0,054
<b>0,81</b>	0,048	0,034	0,031	0,036	0,051
<u>Pot1=</u>	<u>0,01</u>	<u>0,21</u>	<u>0,41</u>	<u>0,61</u>	<u>0,81</u>

Tabla 4-12. Varianzas para el análisis: HM-SDM-PV-C,D,E,F,G-5BS-5X3-1,12-A5



Comparando los valores de la figura 4.7 con la tabla de varianzas 4.12, se observa que cuando las diferencias de las varianzas son pequeñas, las diferencias de las capacidades también lo son, como es el caso que las 3 líneas, azul, roja y rosas están muy próximas.

GRÁFICAS EN 3D PARA SINR=15 dB.  
SISTEMA (5X3)

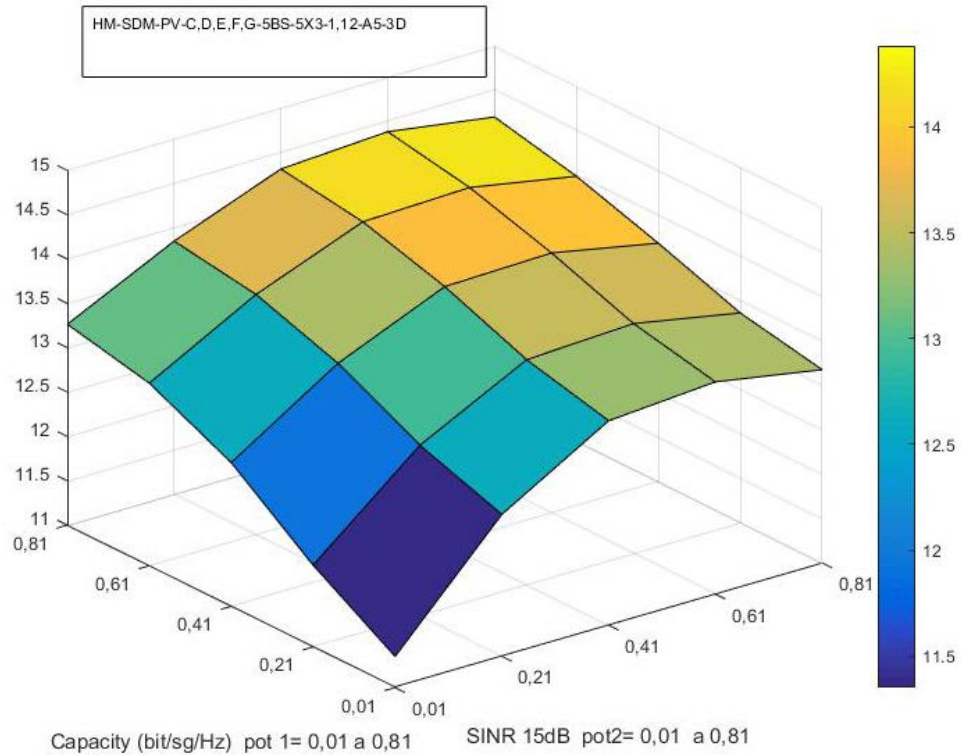


Figura 4-8. Gráfica resultados de capacidad. HM-SDM-PV-C,D,E,F,G-5BS-5X3-1,12-A5-3D

En la figura 4.8 del sistema A5 se observa un incremento de la capacidad al ir dejando de atenuar BS3 ó BS4, comportamiento lógico, aunque en los valores medios de pot2 es cuando se obtiene mayor capacidad de los sistemas.

Se realiza un estudio más detallado de mismo análisis.

La atenuación varía desde 0,3 a 1 en pasos de 0,1, buscando los valores que más afectan.



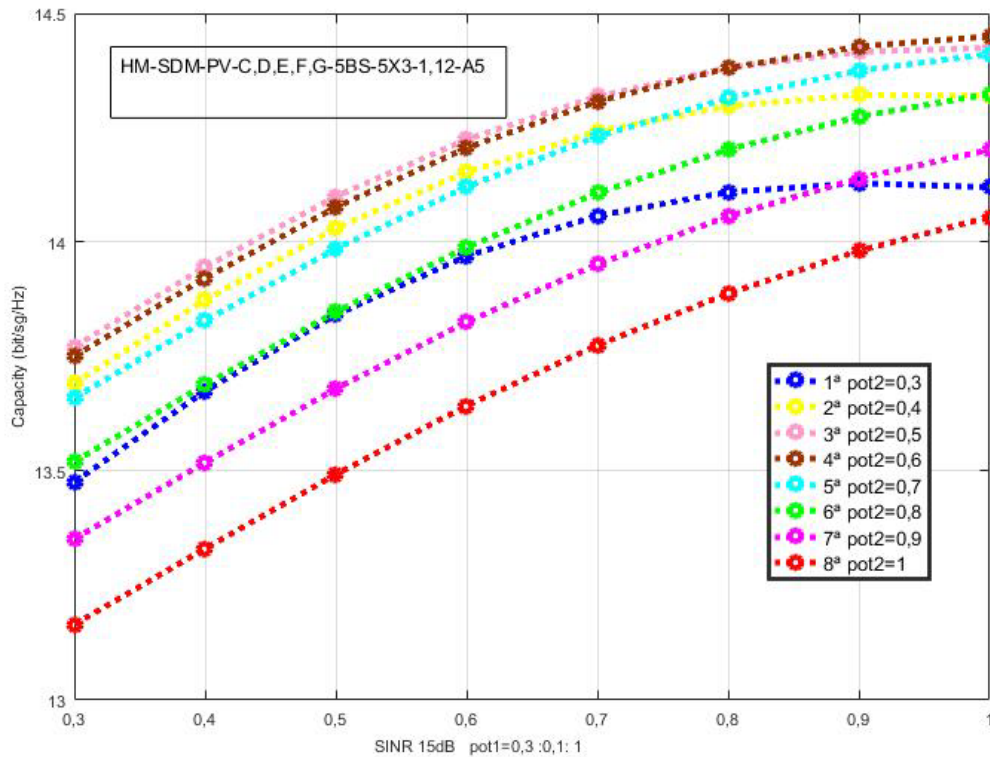


Figura 4-9. Gráfica resultados de capacidad. HM-SDM-PV-A,B,C,D,E-5BS-5X3-1-A5-detail

En este caso el comportamiento es lineal con la atenuación de pot1, excepto la línea azul, cuando pot2 está en 0,3, que para pot1 mayor de 0,7 la capacidad empieza a decaer. Esto es debido a que el sistema se desbalancea en potencia. De hecho, es notorio, que cuando pot2=1, es decir, no se atenúa nada BS4, el sistema está poco balanceado en potencia, y es cuando menor capacidad tiene el sistema.

#### 4.2.6 Análisis sistema A6

El sistema se nombrará como HM-SDM-PV-A,B,E,F,G-5BS-5X3-1,6-A6. Indica un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Análisis variando la potencia, PV. Formado por 5 BS. Se trabaja en el escenario - A,B,E,F,G. 5 antenas transmisoras x 3 antenas receptoras. Se elige la antenna 1 y la 6. Análisis A6.

Se cambian las BS que se atenúan, que no sean ni BS1 ni BS2, que parecen ser las más conflictivas, y que emiten a mayor potencia. También se cambian las antenas elegidas de cada BS de forma que disminuya la correlación del sistema.

ANTENAS RECEPTORAS	1	6	1	6	1
	BS1	BS2	BS3	BS4	BS5

Tabla 4-13. Antenas elegidas caso: HM-SDM-PV-A,B,E,F,G-5BS-5X3-1,6-A6

Correlación media: 0,1511

Se atenúa: BS3 (ESCENARIO C) con pot1;  
BS4 (ESCENARIO D) con pot2;

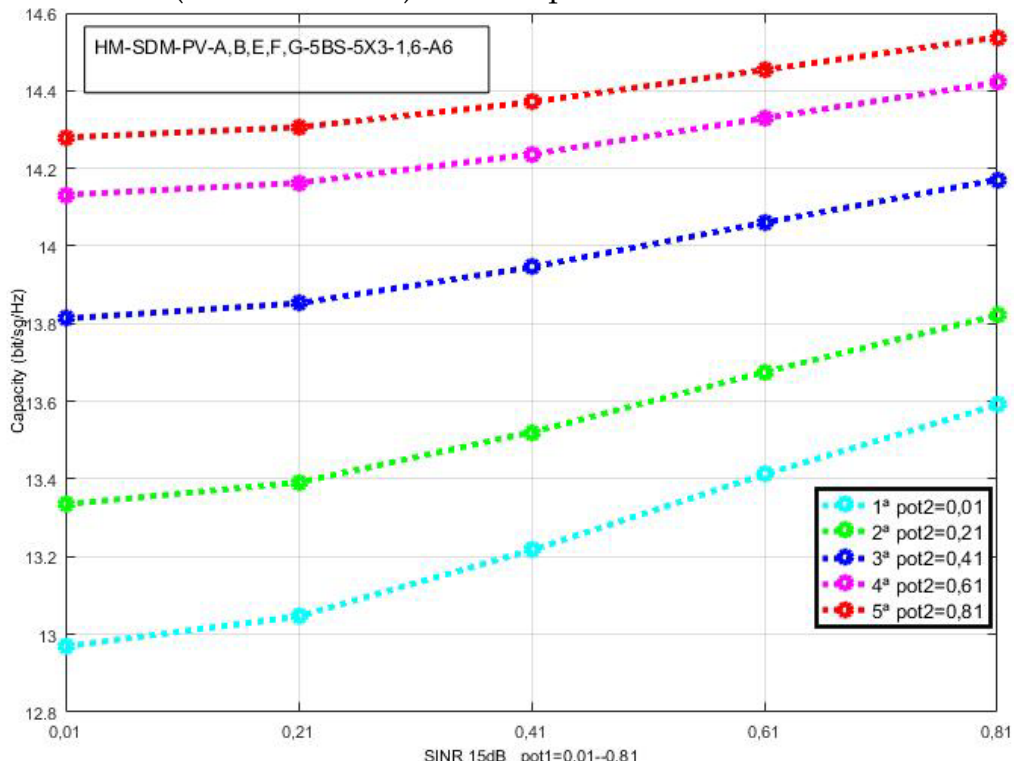


Figura 4-10. Gráfica resultados de capacidad. HM-SDM-PV-A,B,E,F,G-5BS-5X3-1,6-A6

En la figura 4.10, al ir disminuyendo la atenuación de BS3 con pot1, va aumentando linealmente la capacidad del sistema en todas las atenuaciones de pot2, todas las líneas de colores, ya que al atenuar menos BS3, la potencia con la que recibe BS3 es más parecida a la del resto de las BS.

La atenuación con pot2 a BS4, es un caso parecido, las capacidades máximas ocurren linealmente cuanto menos se atenúa BS4.

Las BS elegidas de la 1 a la 5 son las que más potencia emiten, por lo tanto, cuanto menos se atenúen BS3 o BS4, más igualadas están las potencias del total, es decir, sistema más balanceado, y en consecuencia la capacidad aumenta linealmente.

Al dejar de ser BS1 y BS2 las estaciones que se atenúan, aparece un comportamiento más lineal, de forma que, al ir reduciendo la atenuación de las BS, las capacidades aumentan, como es de esperar.

En la tabla 4.14, los valores de pot2 en **negrita**. Los valores de pot1 subrayados.

Pot2=					
<b>0,01</b>	<u>0,178</u>	<u>0,162</u>	<u>0,149</u>	<u>0,138</u>	<u>0,130</u>
<b>0,21</b>	<u>0,151</u>	<u>0,133</u>	<u>0,118</u>	<u>0,107</u>	<u>0,097</u>
<b>0,41</b>	<u>0,132</u>	<u>0,114</u>	<u>0,098</u>	<u>0,085</u>	<u>0,074</u>
<b>0,61</b>	<u>0,124</u>	<u>0,104</u>	<u>0,087</u>	<u>0,072</u>	<u>0,060</u>

<b>0,81</b>	0,125	0,104	0,085	0,069	0,056
<u>Pot1=</u>	<u>0,01</u>	<u>0,21</u>	<u>0,41</u>	<u>0,61</u>	<u>0,81</u>

**Tabla 4-14. Varianzas para el análisis: HM-SDM-PV-A,B,E,F,G-5BS-5X3-1,6-A6**

En la tabla 4.14 de los valores de varianza para cada punto de la figura 4.10. Se observa que las varianzas disminuyen al aumentar los valores de los atenuadores pot1 y pot2. Lo cual coincide con que las capacidades aumenten linealmente con el valor de los atenuadores.

#### 4.2.7 Análisis sistema A7

El sistema se nombrará como HM-SDM-PV-A,C,E,F,G-5BS-5X3-1,12-A7. Indica un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Análisis variando la potencia, PV. Formado por 5 BS. Se trabaja en el escenario - A,C,E,F,G. 5 antenas transmisoras x 3 antenas receptoras. Se elige la antena 1 y la 12. Análisis A7.

En este análisis se elige la BS1 que es la que más potencia recibe con las BS últimas, que son las que menos potencia reciben, y se estudia el resultado.

ANTENAS RECEPTORAS	1	12	1	12	1
	BS1	BS4	BS5	BS6	BS7

**Tabla 4-15. Antenas elegidas caso: HM-SDM-PV-A,C,E,F,G-5BS-5X3-1,12-A7**

Correlación media: 0,4674

Se atenúa: BS1 (ESCENARIO A), con pot1;  
 BS4 (ESCENARIO D), con pot2

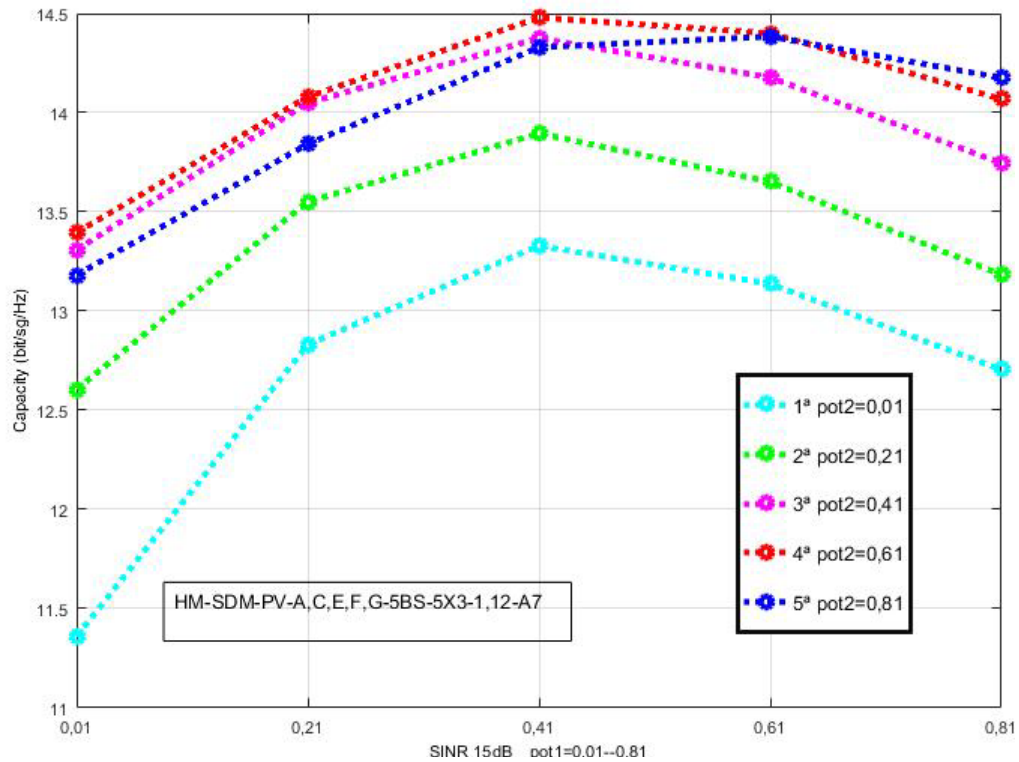


Figura 4-11. Gráfica resultados de capacidad. HM-SDM-PV-A,C,E,F,G-5BS-5X3-1,12-A7

BS1 y BS4 son las que más potencia emiten, de forma que cuando las atenuaciones son altas, multiplicar por 0,01 o 0,21, las capacidades son bajas, y para valores superiores a 0,41 funcionan bien.

Al atenuar BS1 con pot1 vuelve a salir el máximo para atenuaciones de 0,6, incluso para atenuaciones pequeñas de pot1, en BS1, el sistema no mejora la capacidad al reducir la atenuación.

Parece indicar que la BS1 es la que más potencia emite y al normalizar las potencias se carga todo el sistema.

En la tabla 4.15, los valores de pot2 en negrita. Los valores de pot1 subrayados.

Pot2=					
<b>0,01</b>	0,053	0,045	0,052	0,075	0,113
<b>0,21</b>	0,045	0,034	0,038	0,057	0,093
<b>0,41</b>	0,046	0,032	0,033	0,050	0,082
<b>0,61</b>	0,057	0,039	0,037	0,051	0,080
<b>0,81</b>	0,077	0,056	0,051	0,062	0,088
<u>Pot1=</u>	<u>0,01</u>	<u>0,21</u>	<u>0,41</u>	<u>0,61</u>	<u>0,81</u>

Tabla 4-16. Varianzas para el análisis: HM-SDM-PV-A,C,E,F,G-5BS-5X3-1,12-A7

Analizando la tabla 4.16, se observa como la capacidad de la gráfica 4.11, sigue los valores de varianza, teniendo el valor mínimo de varianza para pot1=0,41, y

después sube la varianza. De hecho, en la figura 4.11 los valores máximos de capacidad se obtienen para  $pot1=0,41$ .

### 4.3 Sistema formado por 5 antenas transmisoras y 3 receptoras en 3 BS

El sistema se nombrará como HM-SDM-PV-3BS-5X3.

Indica un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Análisis variando la potencia, PV. Formado por 3 BS. 5 antenas transmisoras x 3 antenas receptoras.

#### Caso de 3 B.S. 2+2+1 antenas receptoras.

Se repite el análisis del punto anterior, pero disminuye el número de BS elegidas, aunque mantengo el número de antenas totales.

Se quiere comprobar si se sigue cumpliendo que la capacidad es máxima cuando el número de un sistema DMIMO tiene menos BS, y si la capacidad aumenta o disminuye cuando el balanceo de potencia entre las BS disminuye o aumenta respectivamente.

Se analizan 3 sistemas que llamaremos A, B y C, en los cuales se cambia los escenarios elegidos, ya que no todas las BS emiten con la misma potencia, y se varían las antenas elegidas dentro de cada BS, para estudiar si el comportamiento de los sistemas sigue al balanceo de potencia y a la correlación.

Se usan los mismo atenuadores  $pot1$ , y  $pot2$ , que atenúan de .01 a 1 en pasos de 0.2.

$pot1=0.01:0.2:1$

$pot2=0.01:0.2:1$

#### 4.3.1 Análisis sistema A

El sistema se nombrará como HM-SDM-PV-A,B,C-3BS-3X5-1,2-A.

Indica un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Análisis variando la potencia, PV. Formado por 3 BS. Se trabaja en el escenario - A,B,C. 5 antenas transmisoras x 3 antenas receptoras. Se elige la antenna 1 y la 2. Análisis A.

ANTENAS RECEPTORAS	1,2	1,2	1
	BS1	BS2	BS3

**Tabla 4-17. Antenas elegidas caso: HM-SDM-PV-A,B,C-3BS-5X3-1,2-A**

Correlación media: 0,5777

Atenuó: BS1 (ESCENARIO A) con  $pot1$ ;  
 BS2 (ESCENARIO B) con  $pot2$ ,

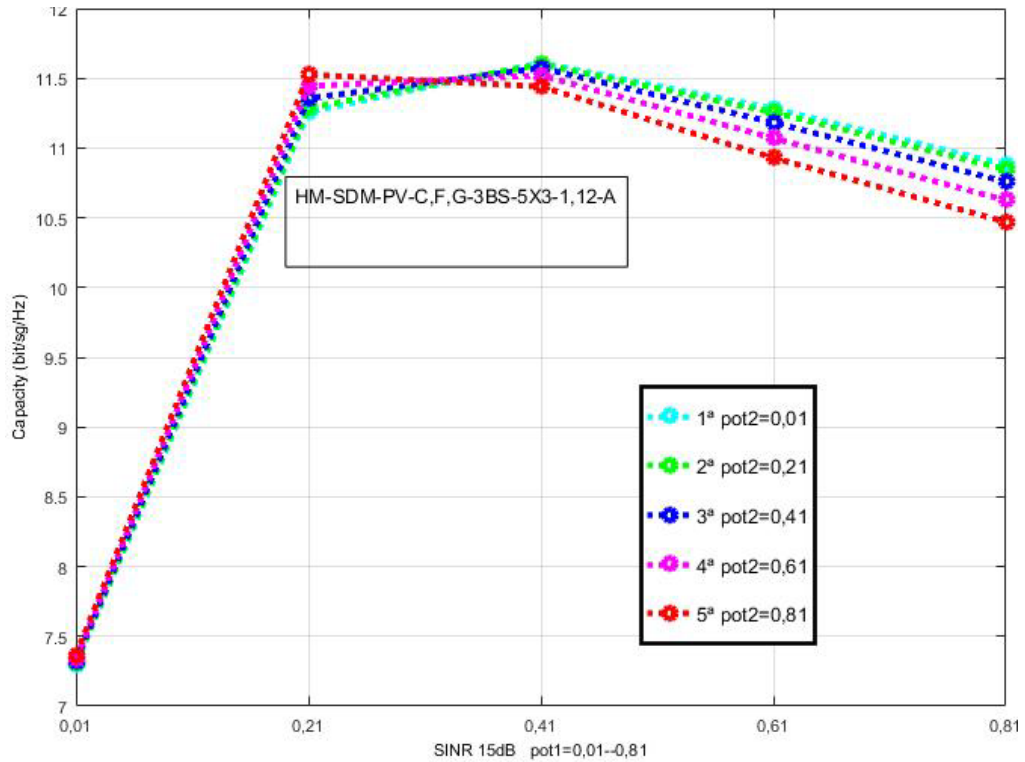


Figura 4-12. Gráfica resultados de capacidad. HM-SDM-PV-A,B,C-3BS-5X3-1,2-A

Se observa en la figura 4.12, que para pot1 muy pequeño, la capacidad es pequeña independientemente del valor de pot2. Como la potencia recibida de BS1 es la mayor, con diferencia respecto al resto de las BS restantes, al ir aumentando la potencia recibida en BS1 el sistema cada vez está más balanceado y en consecuencia aumenta la capacidad. Los mayores valores de capacidad están en pot1= 0,21 y pot1=0,41, que son los valores en que la potencia recibida en BS1 es comparable a la recibida en BS2 y BS3.

Se observa que todas las líneas de colores están muy juntas, ello indica que el balanceo de las potencias no depende mucho del valor de pot2, que es el que atenúa a BS2. Es decir, el sistema está balanceado o no dependiendo del valor de la potencia recibida en BS1.

Es de notar, que como la correlación total del sistema es alta, los valores de capacidad del sistema son bajos, entre 7 y 11 (bits/sg/Hz)

En la tabla 4.18, los valores de pot2 en **negrita**. Los valores de pot1 subrayados.

Pot2=					
<b>0,01</b>	<u>0,033</u>	<u>0,029</u>	<u>0,049</u>	<u>0,093</u>	<u>0,160</u>
<b>0,21</b>	<u>0,027</u>	<u>0,015</u>	<u>0,026</u>	<u>0,061</u>	<u>0,119</u>
<b>0,41</b>	<u>0,029</u>	<u>0,008</u>	<u>0,010</u>	<u>0,036</u>	<u>0,086</u>
<b>0,61</b>	<u>0,039</u>	<u>0,008</u>	<u>0,001</u>	<u>0,019</u>	<u>0,060</u>
<b>0,81</b>	<u>0,055</u>	<u>0,016</u>	<u>0,001</u>	<u>0,009</u>	<u>0,041</u>

Pot1=	0,01	0,21	0,41	0,61	0,81
-------	------	------	------	------	------

**Tabla 4-18. Varianzas para el análisis: HM-SDM-PV-A,B,C-3BS-5X3-1,2-A**

En la tabla 4.18 se observa como lo valores de varianza son menores para pot1=0,21, que es cuando la capacidad es máxima en la figura 4.12, y al aumentar los valores de pot1, la varianza aumenta, poco, al igual que disminuye la capacidad en el gráfico.

Las varianzas para diferentes valores de pot2, son con pocas diferencias y por ello las líneas de colores en la figura 4.12 están muy juntas.

#### 4.3.2 Análisis sistema B.

El sistema se nombrará como HM-SDM-PV-C,D,E-3BS-3X5-1,6-B

Indica un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Análisis variando la potencia, PV. Formado por 3 BS. Se trabaja en el escenario - C,D,E. 5 antenas transmisoras x 3 antenas receptoras. Se elige la antena 1 y la 6. Análisis B.

Se cambia las BS elegidas, y el número de las antenas dentro de cada BS, de forma que disminuya la correlación media, para ver cómo afecta que sea una u otra las BS atenuadas.

ANTENAS RECEPTORAS	1,6	1,6	1
	BS3	BS4	BS5

**Tabla 4-19. Antenas elegidas caso: HM-SDM-PV-C,D,E-3BS-5X3-1,6-B**

Correlación media: 0,1957

Se atenúa: BS3 (ESCENARIO C), con pot1; pot1=0.01:0.2:1  
 BS4(ESCENARIO D), con pot2; pot2=0.01:0.2:1

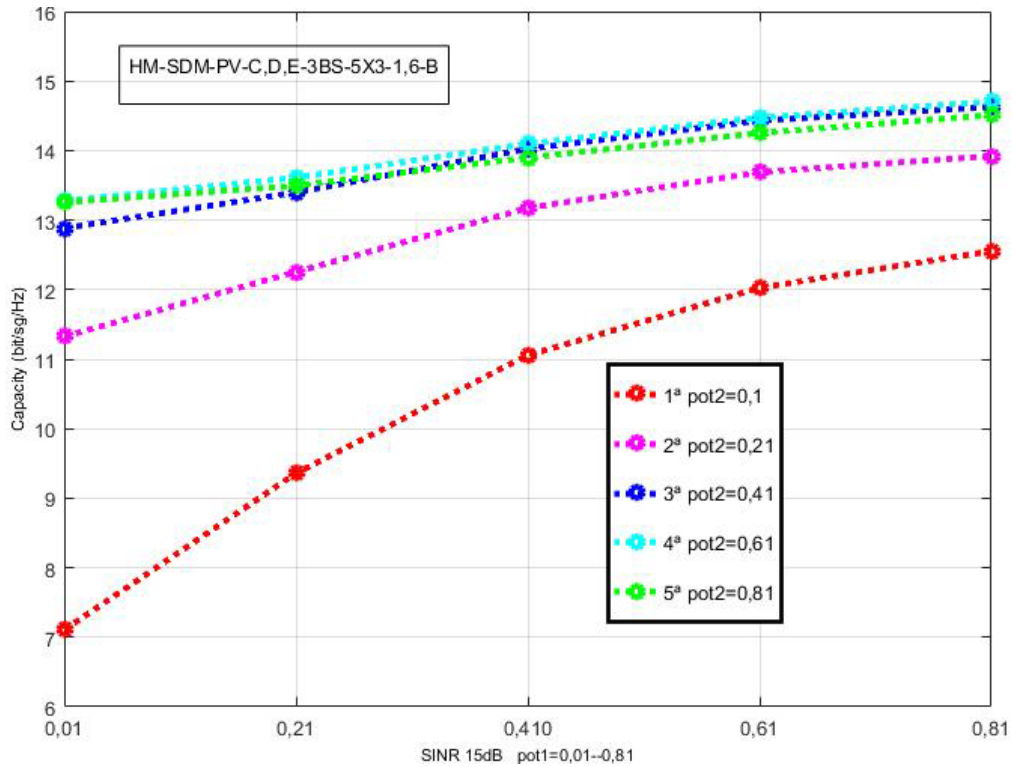


Figura 4-13. Gráfica resultados de capacidad. HM-SDM-PV-C,D,E-3BS-5X3-1,6-B

Este caso es más lineal, es decir cuanto menos se atenúe pot1 mayor es la capacidad, no obstante, si pot1 es muy pequeño, la capacidad es muy baja, y a partir de algún valor de pot1, es decir que la BS3 esté alejada, pero no en exceso, no influye mucho en la capacidad, que esté muy o poco alejada BS3.

Se observa que en la figura 4.13, las líneas verde, cian y azul, están muy juntas, ello indica que los sistemas están balanceados en potencia a partir del atenuado pot2 superior a 0,21.

Las capacidades, en general, de este sistema tienen mayores valores que los del anterior, siendo el mismo número de BS y de antenas, lo que tiene diferente este sistema es la correlación, que es mucho menor que el del caso anterior.

En la tabla 4.20, los valores de pot2 en **negrita**. Los valores de pot1 subrayados.

Pot2=					
<b>0,01</b>	0,064	0,057	0,054	0,053	0,057
<b>0,21</b>	0,054	0,042	0,034	0,029	0,028
<b>0,41</b>	0,059	0,043	0,030	0,020	0,014
<b>0,61</b>	0,080	0,059	0,041	0,026	0,015
<b>0,81</b>	0,116	0,090	0,067	0,048	0,032
<u>Pot1=</u>	<u>0,01</u>	<u>0,21</u>	<u>0,41</u>	<u>0,61</u>	<u>0,81</u>

Tabla 4-20. Varianzas para el análisis: HM-SDM-PV-C,D,E-3BS-5X3-1,6-B



En la tabla 4.20 se observa que al aumentar pot1 las varianzas disminuyen, pero poco, y por ello las gráficas de la figura 4.13 aumentan con poca pendiente. Para valores altos de pot1, cuando tiene menos varianza es con pot2=0,41 y pot2=0,61, que coincide con las líneas azul oscuro y azul claro juntas.

### 4.3.3 Análisis sistema C

El sistema se nombrará como HM-SDM-PV-C,F,G-3BS-3X5-1,12-C.

Indica un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Análisis variando la potencia, PV. Formado por 3 BS. Se trabaja en el escenario - C,F,G. 5 antenas transmisoras x 3 antenas receptoras. Se elige la antena 1 y la 12. Análisis C.

ANTENAS RECEPTORAS	1,12	1,12	1
	BS3	BS6	BS7

Tabla 4-21. Antenas elegidas caso: HM-SDM-PV-C,F,G-3BS-5X3-1,12-C

Correlación media: 0,1148

Se atenúa: BS3 (ESCENARIO C), con pot1; pot1=0.01:0.2:1  
 BS6 (ESCENARIO F), con pot2; pot2=0.01:0.2:1

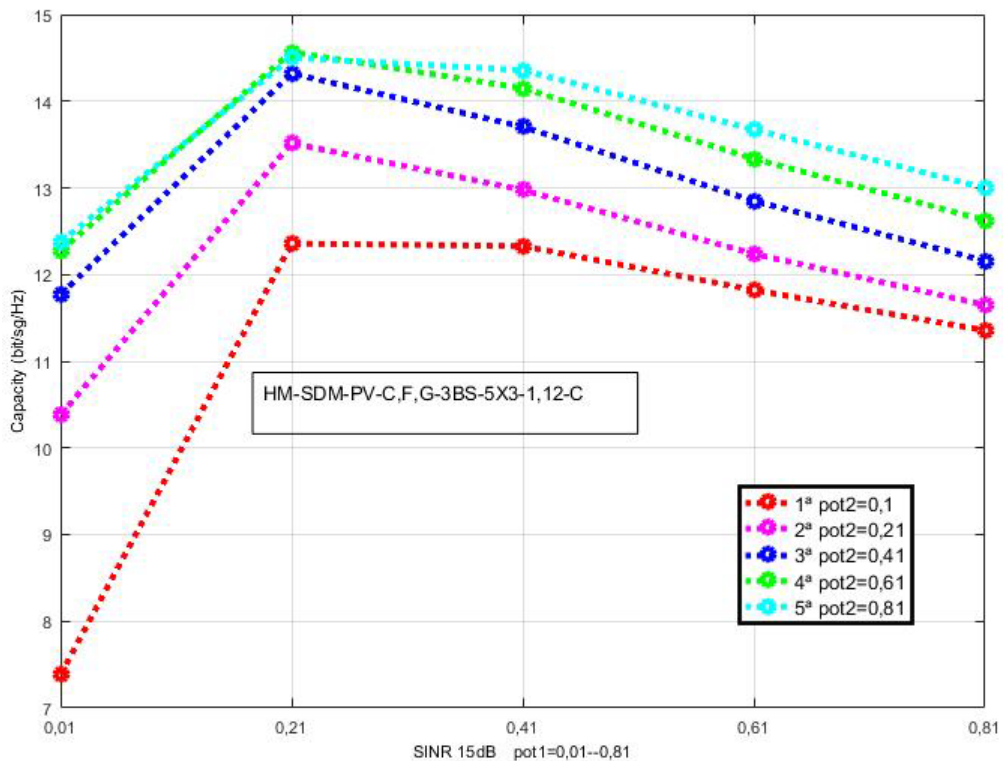


Figura 4-14. Gráfica resultados de capacidad. HM-SDM-PV-C,F,G-3BS-5X3-1,12-C

En la figura 4.14, se aprecia que el valor máximo de la capacidad se obtiene cuando pot1 tiene el valor 0,21, y posteriormente la capacidad disminuye al aumentar el

valor de pot1. Ello es debido a que las BS6 y BS7 son las que menos potencia reciben, y en consecuencia al aumentar el valor de potencia de BS3, el sistema se desbalancea en potencia, y en consecuencia disminuye la capacidad.

El proceso inverso ocurre con pot2, que, al aumentar el valor del atenuador, aumenta la capacidad, ya que como la BS6 recibe poca potencia, cuanto menos se atenúe, más se parece su valor de potencia al resto de las BS y el sistema está más balanceado.

En la tabla 4.22, los valores de pot2 en negrita. Los valores de pot1 subrayados.

<b>Pot2=</b>					
<b>0,01</b>	0,004	0,004	0,006	0,012	0,021
<b>0,21</b>	0,003	0,002	0,004	0,009	0,017
<b>0,41</b>	0,003	0,001	0,002	0,007	0,014
<b>0,61</b>	0,004	0,001	0,001	0,005	0,011
<b>0,81</b>	0,005	0,001	0,000	0,003	0,009
<u>Pot1=</u>	<u>0,01</u>	<u>0,21</u>	<u>0,41</u>	<u>0,61</u>	<u>0,81</u>

**Tabla 4-22. Varianzas para el análisis: HM-SDM-PV-C,F,G-3BS-5X3-1,12-C**

La correlación del sistema es similar a la del punto B, anterior, y en consecuencia sus valores de capacidad oscilan entre valores similares de máximos y mínimos.

Se observa en la tabla 4.22 cómo la varianza toma sus valores mínimos para pot1=0,21, y después aumenta, tal como ocurre en la figura 4.14 con las líneas de colores. Las diferentes líneas de colores también siguen la varianza en la gráfica para los diferentes valores de pot2.

#### **4.4 Sistema formado por 10 antenas transmisoras y 3 receptoras en 5 BS**

El sistema se nombrará como HM-SDM-PV-5BS-10X3.

Indica un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Análisis variando la potencia, PV. Formado por 5 BS. 10 antenas transmisoras x 3 antenas receptoras.

Se aumenta el número de antenas totales a 10, y se repiten los análisis anteriores, pero volviendo a tomar sistemas DMIMO formado por 5 BS.

Se realizan 4 análisis que se llamarán B1, B2, B3 y B4. En ellos se cambiará la BS en la que se atenúa su potencia emitida, y las antenas elegidas dentro de cada BS para variar la correlación y el balanceo de potencia, para estudiar que parámetro influye más en la capacidad de los sistemas.

**Caso de 5 B.S.** 2+2+2+2+2 antenas receptoras.

##### 4.4.1 Análisis sistema B1

El sistema se nombrará como HM-SDM-PV-A,B,C,D,E-5BS-3X10-1,2-B1. Indica un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Análisis variando la potencia, PV. Formado por 5 BS. Se trabaja en el escenario - A,B,C,D,E. 10 antenas transmisoras x 3 antenas receptoras. Se elige la antena 1 y la 2. Análisis B1.

ANTENAS RECEPTORAS	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
	BS1	BS2	BS3	BS4	BS5

Tabla 4-23. Antenas elegidas caso: HM-SDM-PV-A,B,C,D,E-5BS-10X3-1,2-B1

Correlación media: 0,2988

Atenuo: BS1(ESCENARIO A), con pot1; pot1=0.01:0.2:1  
 BS2 (ESCENARIO B) con pot2; pot2=0.01:0.2:1

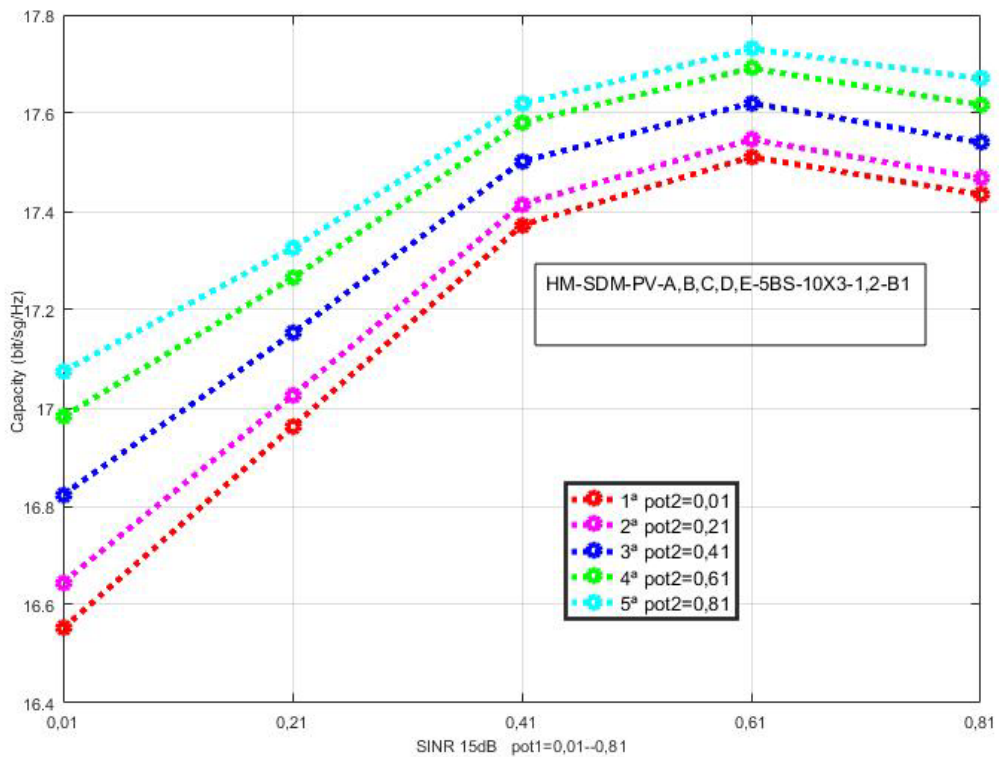


Figura 4-15. Gráfica resultados de capacidad. HM-SDM-PV-A,B,C,D,E-5BS-10X3-1,2-B1

El comportamiento es muy similar al caso B1 de 3BS estudiado anteriormente, con el valor máximo de la capacidad en pot1= 0,61, y con valores ascendentes de capacidad conforme aumenta el valor del atenuador pot2. La correlación del sistema es muy parecida al caso anterior de 3 BS, pero la diferencia con respecto al caso anterior, es que los valores de capacidad en el caso de 3BS estaban entre valores máximos y mínimos de 13,6 y 14,8 (bit/s/g/Hz), y ahora andan entre valores de 14,5 y 17,7 (bit/s/g/Hz). Esta subida de capacidad del sistema es debido a que ahora se usan 5 BS en el sistema DMIMO.

En la tabla 4.24, los valores de pot2 en **negrita**. Los valores de pot1 subrayados.

<b>Pot2=</b>					
<b>0,01</b>	0,105	0,082	0,072	0,077	0,095
<b>0,21</b>	0,090	0,065	0,053	0,056	0,072
<b>0,41</b>	0,079	0,052	0,038	0,039	0,054
<b>0,61</b>	0,073	0,043	0,028	0,027	0,040
<b>0,81</b>	0,071	0,040	0,022	0,019	0,030
<u>Pot1=</u>	<u>0,01</u>	<u>0,21</u>	<u>0,41</u>	<u>0,61</u>	<u>0,81</u>

**Tabla 4-24. Varianzas para el análisis: HM-SDM-PV-A,B,C,D,E-5BS-10X3-1,2-B1**

En la tabla 4.24 se observa cómo se cumple que los valores menores de varianza coinciden con los valores máximos de capacidad en la figura 4.15. Los valores mínimos de varianza se producen cuando el atenuador pot1 está en 0,61, que es cuando las curvas en la figura 4.15 se curvan porque tienen un máximo. Así mismo los valores de varianza disminuyen cuando pot2 aumenta, para cualquier valor de pot1.

#### 4.4.2 Análisis sistema B2

El sistema se nombrará como HM-SDM-PV- A,B,C,D,E -5BS-3X10-1,5-B2.

Indica un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Análisis variando la potencia, PV. Formado por 5 BS. Se trabaja en el escenario - A,B,C,D,E. 10 antenas transmisoras x 3 antenas receptoras. Se elige la antena 1 y la 5. Análisis B2.

Se cambia las BS elegidas y el número de las antenas dentro de cada BS, para que el sistema sea menos correlado. Ahora se atenúan las BS5 y las BS6, que de ellas la BS6 es de las que menos potencia reciben, y ello debe influir en la capacidad en función de los atenuadores.

ANTENAS RECEPTORAS	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
	BS1	BS2	BS5	BS6	BS7

**Tabla 4-25. Antenas elegidas caso: HM-SDM-PV-A,B,E,F,G-5BS-10X3-1,5-B2**

Correlación media: 0,1445

Atenúo:        BS5 (ESCENARIO E)        con pot1;                    pot1=0.01:0.2:1  
                   BS6 (ESCENARIO F)        con pot2,                    pot2=0.01:0.2:1

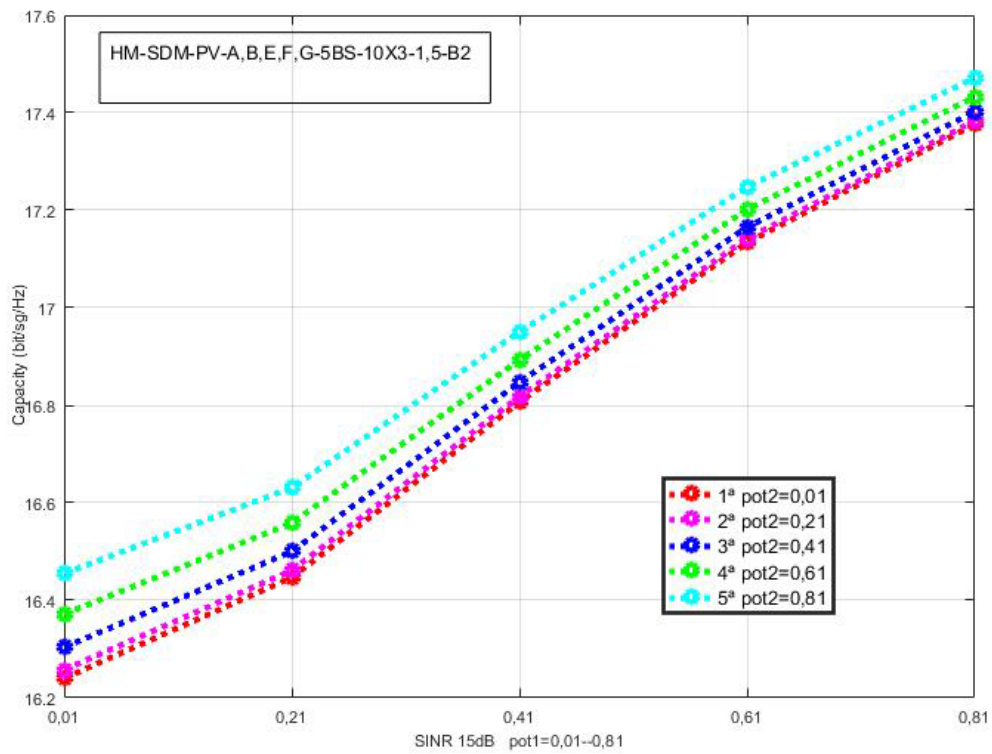


Figura 4-16 .Gráfica resultados de capacidad. HM-SDM-PV-A,B,E,F,G-5BS-10X3-1,5-B2

Como pot1 atenúa BS5, que tiene una potencia recibida media alta, y las otras BS elegidas son BS1 y Bs2 que tienen potencias recibidas altas, al ir aumentando la potencia recibida de BS5, aumenta la capacidad linealmente, ya que se parece más al resto de las potencias.

El atenuador pot2 modifica la potencia de BS6, que es de las que recibe menos potencia, con lo cual que varíe el atenuador no influye mucho en el balanceo total del sistema y por ello no varía mucho la capacidad en función del valor del atenuador pot2. Es decir, las líneas de colores están muy juntas.

Los valores de capacidad son parecidos a los valores del caso anterior de 5 BS.

En la tabla 4.26, los valores de pot2 en **negrita**. Los valores de pot1 subrayados.

Pot2=					
<b>0,01</b>	0,154	0,140	0,131	0,126	0,126
<b>0,21</b>	0,150	0,136	0,126	0,121	0,121
<b>0,41</b>	0,146	0,132	0,122	0,116	0,116
<b>0,61</b>	0,143	0,128	0,118	0,112	0,111
<b>0,81</b>	0,139	0,124	0,114	0,108	0,107
<u>Pot1=</u>	<u>0,01</u>	<u>0,21</u>	<u>0,41</u>	<u>0,61</u>	<u>0,81</u>

Tabla 4-26. Varianzas para el análisis: HM-SDM-PV-A,B,E,F,G-5BS-10X3-1,5-B2

En la tabla 4.26 de varianzas se observa cómo se cumple que para cualquier valor del atenuador pot2, las varianzas disminuyen conforme aumenta pot1, y por ello

las líneas en la figura 4.16 son crecientes. Los valores de varianza al modificar pot2 no son muy diferentes, y por ello las líneas están muy juntas.

4.4.3 Análisis sistema B3.

El sistema se nombrará como HM-SDM-PV-A,B,C,D,E-5BS-10X3-6,12-B3. Indica un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Análisis variando la potencia, PV. Formado por 5 BS. Se trabaja en el escenario - A,B,C,D,E. 10 antenas transmisoras x 3 antenas receptoras. Se elige la antena 6 y la 12. Análisis B3.

ANTENAS RECEPTORAS	6,12	6,12	6,12	6,12	6,12
	BS1	BS2	BS3	BS4	BS6

Tabla 4-27. Antenas elegidas caso:HM-SDM-PV-A,B,C,D,F-5BS-10X3-6,12-B3

Obtengo HA3. Correlación media: 0,2068

Se atenúa: BS2 (ESCENARIO B), con pot1; pot1=0.01:0.2:1  
 BS4 (ESCENARIO D), con pot2; pot2=0.01:0.2:1

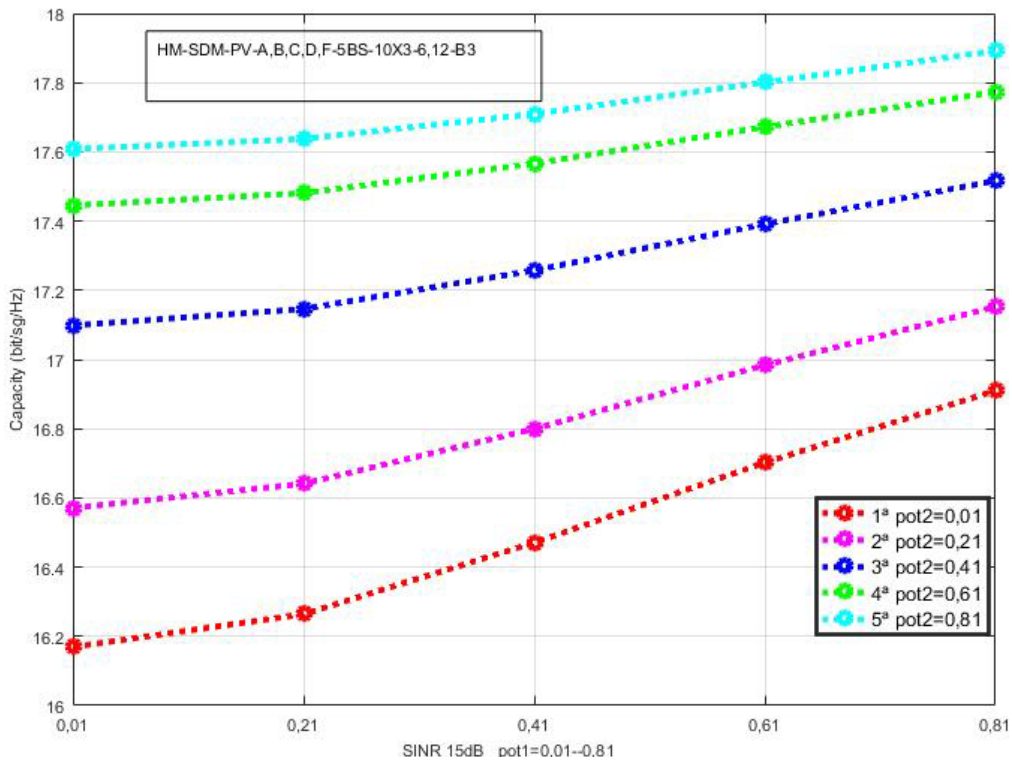


Figura 4-17. Gráfica resultados de capacidad. HM-SDM-PV-A,B,C,D,F-5BS-10X3-6,12-B3

Se observa que la variación de la capacidad con el atenuador pot1 es lineal, y al ir disminuyendo la atenuación de pot1, la capacidad varía linealmente, ya que pot1 atenúa a BS2, con potencia media sobre 0,5, y como el resto de las BS reciben mucha potencia, excepto BS6, pues al aumentar la potencia recibida de BS2 aumenta el

balanceo o igualdad de potencias recibidas en la mayoría de las antenas, y por ello aumenta la capacidad.

También ocurre lo mismo con el atenuador pot2, que atenúa BS4, que es una de las BS que más potencia recibe. Como BS es la segunda que más potencia recibe, cuando el atenuador pasa de 0,61 a 0,81, la potencia recibida pasa a ser un poco elevada, y el incremento de capacidad es menor.

En la tabla 4.28, **los valores de pot2 en negrita**. Los valores de pot1 subrayados.

<b>Pot2=</b>					
<b>0,01</b>	0,127	0,118	0,112	0,108	0,106
<b>0,21</b>	0,112	0,102	0,095	0,090	0,087
<b>0,41</b>	0,107	0,096	0,087	0,081	0,077
<b>0,61</b>	0,110	0,098	0,088	0,081	0,075
<b>0,81</b>	0,123	0,109	0,098	0,090	0,083
<u>Pot1=</u>	<u>0,01</u>	<u>0,21</u>	<u>0,41</u>	<u>0,61</u>	<u>0,81</u>

**Tabla 4-28. Varianzas para el análisis: HM-SDM-PV-A,B,C,D,F-5BS-10X3-6,12-B3**

Todo ello es confirmable con los valores de varianza de la tabla 4.28. Conforme los valores de los atenuadores pot1 y pot2 aumentan, las varianzas disminuyen, lo que se corresponde con el aumento lineal de la capacidad en la figura 4.17.

#### 4.4.4 Análisis sistema B4

El sistema se nombrará como HM-SDM-PV-A,B,C,D,E-5BS-10X3-1,2-B4. Indica un sistema obtenido a través de matriz medida, HM. Sistema DMIMO, SDM. Análisis variando la potencia, PV. Formado por 5 BS. Se trabaja en el escenario - A,B,C,D,E. 10 antenas transmisoras x 3 antenas receptoras. Se elige la antena 1 y la 2. Análisis B4.

Se toma las BS del sistema B1, pero tomando diferente número de antenas en cada BS, para que varíe la correlación.

ANTENAS RECEPTORAS	1,4	3,7	6,10	9,1	12,4
	BS1	BS2	BS3	BS4	BS5

**Tabla 4-29. Antenas elegidas caso: HM-SDM-PV-A,B,C,D,E-5BS-10X3-1,2-B4**

Correlación media: 0,2040

Atenuo:      BS1 (ESCENARIO A),      con pot1;      pot1=0.01:0.2:1  
                  BS2 (ESCENARIO B),      con pot2;      pot2=0.01:0.2:1

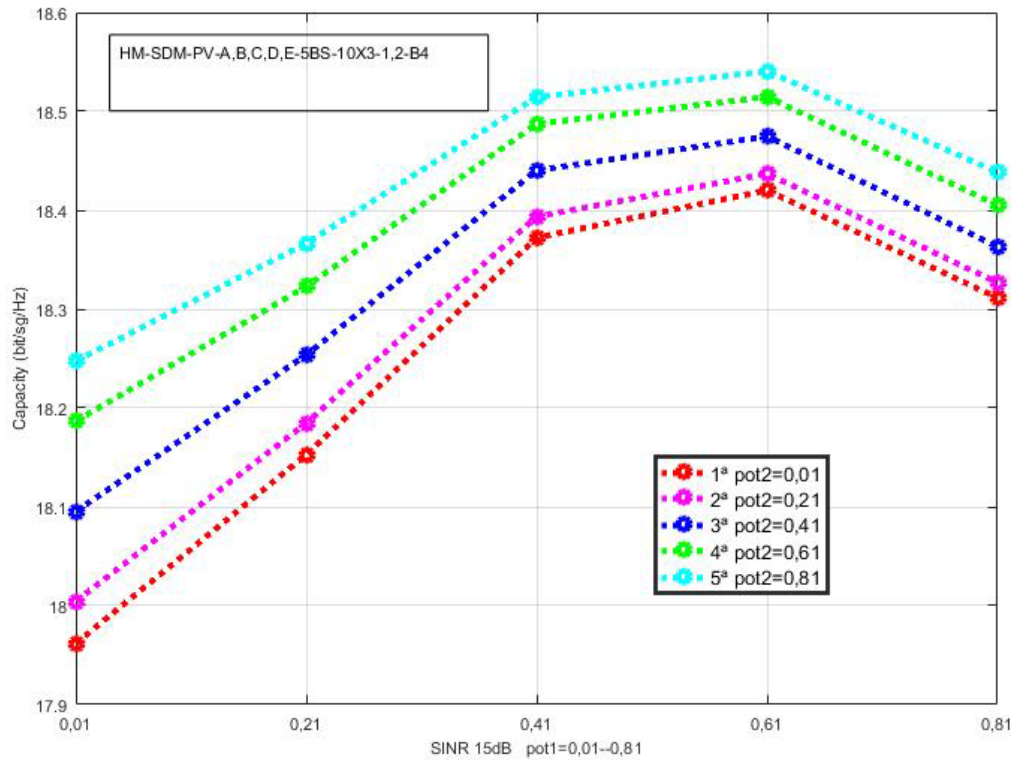


Figura 4-18. Gráfica resultados de capacidad. HM-SDM-PV-A,B,C,D,E-5BS-10X3-1,2-B4

El comportamiento es similar al caso B1. En el sentido que se produce un máximo de capacidad para  $pot1=0,61$ , y aumenta linealmente para incrementos de  $pot2$ . Se han elegido las antenas variadas en cada BS, para mejorar la correlación. La correlación en este caso es un poco menor que el del caso B1, pero no excesivamente de pasa de  $0,2988$  en el caso A1 a  $0,2040$  en el este caso B4. Aun así, se produce un incremento de la capacidad, que en caso A1 oscila entre valore mínimos y máximos de  $16,5$  y  $17,8$ , y en este caso B4 oscila entre valores mínimos y máximos de  $17,95$  y  $18,4$ .

En la tabla 4.30, los valores de  $pot2$  en **negrita**. Los valores de  $pot1$  subrayados.

Pot2=					
<b>0,01</b>	0,102	0,081	0,073	0,079	0,099
<b>0,21</b>	0,090	0,067	0,058	0,062	0,081
<b>0,41</b>	0,081	0,057	0,046	0,049	0,065
<b>0,61</b>	0,075	0,049	0,037	0,038	0,053
<b>0,81</b>	0,073	0,045	0,031	0,031	0,044
<u>Pot1=</u>	<u>0,01</u>	<u>0,21</u>	<u>0,41</u>	<u>0,61</u>	<u>0,81</u>

Tabla 4-30. Varianzas para el análisis: HM-SDM-PV-A,B,C,D,E-5BS-10X3-1,2-B4

Los valores de varianza de la tabla 4.30 confirman que la varianza es mínima en  $pot1=0,61$  para cualquier valor de  $pot2$ , que es donde está el máximo de capacidad.



#### 4.5 Conclusiones.

En este capítulo se repiten los análisis del capítulo anterior, pero variando las potencias de las señales emitidas en cada BS, de forma que se atenúan potencias de algunas BS simulando que el transmisor y receptor están alejados, se calcula la capacidad para cada valor de potencia atenuada y se comprueba si hay relación con la correlación del sistema en cada caso.

Estas simulaciones variando la potencia se han realizado sobre sistemas DMIMO de 5 y 10 antenas totales, repartidas las antenas en 5BS y 3 BS.

Para cada caso se ha calculado la capacidad del sistema y la correlación de cada caso, estudiando qué variable afecta más.

Los resultados obtenidos en los diferentes análisis realizados, son que en los sistemas DMIMO formados por 5 BS ó 3 BS, al variar las potencias recibidas de las diferentes BS, la capacidad del sistema sigue directamente la relación que existe entre las diferentes potencias recibidas en las BS. Es decir, cuanto más balanceado, o igualadas estén las potencias recibidas por las BS del sistema, mayor es la capacidad del sistema.

En todos los casos analizados se ha comprobado que la capacidad aumenta o disminuye según la varianza de potencia recibida entre las diferentes BS disminuye o aumenta.

Si es de notar, que, aunque la capacidad sigue fielmente los valores de la varianza, en sentido inverso, de forma que cuando sube la varianza baja la capacidad, las variaciones de capacidad debidas al valor de la varianza de potencia son pequeñas, de forma que entre unos valores máximos y mínimo de capacidad, apenas difieren 2 (bits/sg/Hz).

En los diferentes análisis también se ha variado el número y situación de las antenas elegidas y de las BS, de forma que varía la correlación de los sistemas.

Se ha comprobado, como se ha comentado en el capítulo, que la capacidad del sistema varía con la correlación, y de una forma tan importante como respecto al balanceo de potencia entre las diferentes BS, unos 2 (bits/sg/Hz)..

También se ha variado el número de antenas elegidas repartidas en 3 BS ó 5 BS. Se ha comprobado que el usar 3 BS ó 5 BS apenas varía en los cálculos de capacidad, aumentan las capacidades medias del orden de 1 (bits/sg/Hz). En cambio, lo que si aumenta la capacidad es usar 10 antenas en lugar de 5 antenas. Este parámetro aumenta los valores medios de capacidad en unos 6 (bits/sg/Hz).

## 5. SISTEMAS MIMO DISTRIBUIDOS MASIVOS EN ALTA FRECUENCIA.

### 5.1 Introducción.

Después de analizar pormenorizadamente los sistemas D-MIMO y D-MIMO Masivos en cuanto al número de antenas necesarias, el número de estaciones base necesarias y el grado de balanceado de potencia necesario para alcanzar las capacidades máximas en estos sistemas se va realizar un análisis de los sistemas D-MIMO Masivos de alta frecuencia. Para realizar este análisis se partió del simulador del centro de investigación de NYU WIRELESS. Al simulador llamado NYUSIM se puede acceder desde su página web [69]. El centro de investigación de NYUSIM ha validado [52] su simulador a través de medidas realizadas en las frecuencias de ondas milimétricas, de 28 a 73 GHz, en varios entornos: urbanos Microcélulas (UMi), Urbanos Macrocelulas (UMa) y Rurales Macrocelulas (RMa). Cada uno de estos escenarios se ha hecho con y sin visión directa (LOS y NLOS). Las simulaciones que permite realizar este simulador incluyen las frecuencias desde los 500 MHz a 100 GHz.

Para esta tesis se ha desarrollado un software, en Matlab, que a partir del código base, obtenido de NYU WIRELESS, ha permitido simular diferentes sistemas en diferentes entornos de propagación. El simulador de NYU WIRELESS, permite obtener los parámetros  $S_{21}$  de propagación, y con el software desarrollado en esta tesis, se han obtenido las matrices de propagación "H" en diferentes entornos de propagación y en diferentes frecuencias. Así se han desarrollado scripts que determinan los diferentes escenarios de propagación, las frecuencias de propagación, ancho de banda de canal, número de antenas en transmisión y recepción, condiciones de visibilidad y distancias posibles entre transmisor y receptor. Una vez determinados las condiciones de propagación a simular, se obtiene la matriz de propagación H, para cada uno de esos entornos de propagación. A continuación, se ha implementado un sistema que permite analizar **Sistemas MIMO Distribuidos Masivos DM-MIMO** que no permitían su análisis el simulador. Se ha realizado un análisis de sistemas DM-MIMO en varias frecuencias (28, 40 y 78 GHz) en distintas condiciones de visibilidad y a diferentes distancias, llegando a emular más de 100 sistemas diferentes. Todas estas emulaciones están almacenadas en más de un Terabyte de datos.

#### 5.1.1 Implementación de los Sistemas DM-MIMO.

Nuestro emulador del canal permite la selección por entrada en el programa de 28 parámetros, divididos en dos grupos principales: Parámetros de canal, y parámetros de antena.

Los parámetros de canal son:

- Frecuencia. Elegible de 28 GHz a 100GHz en pasos de 0,5 GHz.
- Ancho de banda de la señal, elegible de 0 a 800 MHz.
- Escenario, elegible entre UMi, UMa, y RMa.
- Ambiente de propagación, elegible entre visibilidad directa (LOS) y no visibilidad directa (NLOS).
- Distancia entre el transmisor (TX) y receptor (RX), elegibles entre 10 y 50 metros.
- Potencia del transmisor, elegible entre 0 y 30 dBm.
- Número de posiciones del receptor, elegibles entre 1 y 10 posiciones.
- Presión barométrica, para incluir las pérdidas de propagación producidas por el aire seco, modificables entre  $10^{-5}$  y 1013.25 mbar. [82]
- Humedad del aire, elegible entre 0 y 100%.
- Temperatura en grado Celsius, elegible entre -100 y 50 °C. [82]
- Cantidad de lluvia, elegible entre 0 y 150 mm/hr.
- Relación de Polarización entre las antenas transmisoras y receptoras. Elegible entre copolarizada y con polarización cruzada. Esto último, variable entre 5 dB y 27 dB. [83], [84], [85].
- Pérdidas debidas al follaje, vegetación. Solo se puede elegir entre que existan o no dichas pérdidas.
- Distancia en metros que atraviesa la señal transmitida el follaje.
- Atenuación debida al follaje en dB/m. elegible entre 0 y 10 dB/m. [85]

Los parámetros debidos a las características de las antenas son:

- Tipo de array de las antenas transmisoras. Puede ser lineal o rectangular.
- Tipo de array de las antenas receptoras. Puede ser lineal o rectangular.
- Número de elementos del array de antenas transmisoras. Elegible entre 1 y 128 antenas.
- Número de elementos del array de antenas receptoras. Elegible entre 1 y 64 antenas.
- Distancia entre antenas adyacentes en el array de antenas transmisoras, en longitudes de onda. Elegible entre 0,1 y 10.

- Distancia entre antenas adyacentes en el array de antenas receptoras, en longitudes de onda. Elegible entre 0,1 y 10.
- Número de elementos de antena por fila en el array de antenas transmisoras.
- Número de elementos de antena por fila en el array de antenas receptoras.
- Angulo de azimut del array de antenas transmisoras en grados, del ancho de haz en media potencia, half-power-beamwidth (HPBW). Elegible entre 7° y 360°.
- Angulo de elevación del array de antenas transmisoras en grados, del ancho de haz en media potencia, half-power-beamwidth (HPBW). Elegible entre 7° y 45°.
- Angulo de azimut del array de antenas receptoras en grados, del ancho de haz en media potencia, half-power-beamwidth (HPBW). Elegible entre 7° y 360°.
- Angulo de elevación del array de antenas receptoras en grados, del ancho de haz en media potencia, half-power-beamwidth (HPBW). Elegible entre 7° y 45°.

El primer paso que se dio es seleccionar los entornos que se iban a emular y los parámetros se pueden ver en la siguiente tabla 5.1:

Características	Valores Emulados
Frecuencia	10 GHz, 28 GHz, 40 GHz y 78 GHz.
Escenarios de propagación	RMa, UMa, UMi.
Condiciones de visibilidad	LOS, NLOS
Distancia entre el transmisor y el receptor	5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 y 100 metros
Número de antenas en el transmisor	200 antenas, array lineal.
Número de antenas en el receptor	20 antenas, array lineal.
Número de localizaciones diferentes	10
Distancia entre las antenas adyacentes en el transmisor:	1 y 5 longitudes de onda.
Distancia entre las antenas adyacentes en el receptor	1 y 5 longitudes de onda.
Ángulo de elevación del transmisor	10 y 90 grados.
Ancho de banda	800 MHz
Humedad del aire	50% Sin precipitación de lluvia ni atenuación de follaje o arboleda
Potencia de transmisión	30 dBm.

**Tabla 5-1. Parámetros de simulación.**

Todas las variantes de canal y antenas elegidas en el cuadro anterior, han sido simuladas en el **Supercomputador Picasso, del Centro de Proceso de Datos de la Universidad de Málaga**, sin la cual no hubiera sido posible obtener los ficheros que me permitan obtener las matrices H de propagación dado el alto coste computacional de realizar todas estas simulaciones. El tamaño de cada matriz H es de unos 500 Mbyte, por lo cual el conjunto de las matrices H simuladas ocupa un tamaño total de unos 500 GBytes. A partir de estas matrices H, se implementa el segundo sistema que emula los sistemas DM-MIMO que implica recursos de Terabytes. La diferencia con respecto a los valores obtenidos en el punto 4 de esta tesis, es que ahora se trabaja con un número mayor de antenas, y a frecuencias altas.

Otra diferencia es que el punto 3 de esta tesis se partía de matrices H obtenidas como resultados de unas medidas, y ahora se obtienen las matrices H como resultados de unas simulaciones software, lo cual me permite obtener matrices H para un número mucho mayor de entornos de propagación, con muchas más características.

A partir de las matrices H, obtenidas para cada canal de propagación y cada sistema simulado, para evaluar cada sistema se calcula la capacidad del sistema en bits/sg/Hz, para diferentes valores de SINR, de 0 a 35 dB en pasos de un dB. También se ha obtenido el Condition Number (CN) para cada sistema simulado. El rango de una matriz es la dimensión del espacio vectorial generado (o expandido) por sus columnas (o filas), [86], y determina cuántos flujos de datos se pueden multiplexar sobre el canal en el contexto de las comunicaciones MIMO [11], [87], [88].

El CN se define como la relación del valor singular de mayor a menor en la descomposición de valores singulares de una matriz, y es una medida para caracterizar la calidad de los canales MIMO en el contexto de las comunicaciones inalámbricas, [89], [11] [87]. El CN será alto (por ejemplo, más de 20 dB) si el valor singular mínimo está cerca de cero, y será 0 dB si los valores singulares son iguales. Físicamente, un pequeño valor de CN (por ejemplo, por debajo de 20 dB) indica una buena ortogonalidad de diferentes subcanales. El CN está relacionado con el rango de una matriz: un CN bajo generalmente corresponde a un rango alto y viceversa; la matriz tiene rango completo (el rango más alto) cuando el número de condición es igual o cercano a 0 dB (el número de condición teórico más bajo).

### 5.1.2 Nomenclatura.

En este caso la nomenclatura varía un poco respecto a la elegida en el punto 3 anterior, manteniendo los principales puntos descriptivos. Se utiliza esta nueva nomenclatura para referirse a los diferentes apartados, en las siguientes tablas:

<b>ÍNDICE DE NOMENCLATURAS:</b>			
<b>Tipos de matriz:</b>		<b>Tipos de sistemas a analizar:</b>	
HT	Matriz teórica.	SS	Sistema SIMO
HM	Matriz obtenida a través de medida.	SM	Sistema MIMO
HS	Matriz obtenida por simuladores.	SDM	Sistema DMIMO
PV → Análisis en potencia variable (Caso de que sea este tipo de análisis) a,b,c,... Antenas elegidas en recepción números a,b,c			
<b>FRECUENCIA: Las simulaciones se han realizado a 28 GHz, 40 GHz, 78GHz, seleccionadas como:</b>		<b>ESCENARIOS : 3 escenarios simulados posibles:</b>	
28 GHz		RMa	Rural Macro células
40GHz		UMa	Urbano Macro células

78 GHz	UMi	Urbano Micro células
NC	Sistema no correlado	
<b>LINEAS DE VISIÓN:</b>		
LOS	Con línea de visibilidad directa	
NLOS	Sin línea de visibilidad directa	

**Tabla 5-2. Nomenclatura. Índice.**

Ejemplo de nomenclatura:

HM-SM-A-TRxRX\_a,b,c,d,...: Matriz medida, sistema MIMO, escenario A, n° antenas Tr x n° antenas receptoras

<b>Sistemas TEORICO</b>	
HT	Matriz teórica.
SM-	Sistemas MIMO
SDM	Sistemas DMIMO
n° BS	n° de BS utilizadas
<b>FRECUENCIA: 28 GHz, 40 GHz y 78 GHz</b>	
<b>ESCENARIOS : 3 escenarios simulados posibles:</b>	
RMa	Rural Macro células
UMa	Urbano Macro células
UMi	Urbano Micro células
<b>LINEAS DE VISIÓN:</b>	
LOS	Con línea de visibilidad directa
NLOS	Sin línea de visibilidad directa
NTX	Número de antenas transmisoras totales
NRX	Número de antenas receptoras totales

**Tabla 5-3. Nomenclatura. Sistema teórico.**

Ejemplo de nomenclatura:

HS-SM-NTX-NRX

Matriz simulada, sistema MIMO, n° antenas NTX x n° antenas receptoras

<b>Sistemas MIMO (Implica un único escenario de Medida)</b>	
HS	Matriz simulada.
SM	Sistemas MIMO
PV	Análisis en potencia variable (Caso de que sea este tipo de análisis)
NC	Sistema no correlado
<b>FRECUENCIA: 28 GHz, 40 GHz y 78 GHz</b>	
<b>ESCENARIOS : 3 escenarios simulados posibles:</b>	
RMa	Rural Macro células
UMa	Urbano Macro células
UMi	Urbano Micro células
<b>LINEAS DE VISIÓN:</b>	
LOS	Con línea de visibilidad directa
NLOS	Sin línea de visibilidad directa

NTX	Número de antenas transmisoras totales
NRX	Número de antenas receptoras totales
a,b,c,	Antenas elegidas en recepción números a,b,c
A1	Número de medida

**Tabla 5-4. Nomenclatura. Sistema MIMO**

Ejemplo de nomenclatura:

HS-SM-28G- PV -Rma-LOS-NTXxNRX-a,b,c,d-A1

Matriz simulada, sistema MIMO, medida a 28 GHz, escenario de medida Rma, con visibilidad directa, n° antenas NTX x n° antenas receptoras NRX, antenas elegidas: a,b,c,d, Medida realizada A1.

<b>Sistemas DMIMO (varias BS de medida)</b>	
HS	Matriz Simulada.
SDM	Sistemas DMIMO
DM-MIMO	Sistemas MIMO Distribuidos Masivos
n° BS	n° de BS utilizadas
NC	Sistema no correlado (Caso de que sea este tipo de análisis)
PV	Análisis en potencia variable (Caso de que sea este tipo de análisis)
<b>FRECUENCIA: 28 GHz, 40 GHz y 78 GHz</b>	
<b>ESCENARIOS : 3 escenarios simulados posibles:</b>	
RMa	Rural Macro células
UMa	Urbano Macro células
UMi	Urbano Micro células
<b>LINEAS DE VISIÓN:</b>	
LOS	Con línea de visibilidad directa
NLOS	Sin línea de visibilidad directa
NTX	Número de antenas transmisoras totales
NRX	Número de antenas receptoras totales
A1	Número de medida

**Tabla 5-5. Nomenclatura. Sistema DMIMO.**

Ejemplo de nomenclatura:

HM-SDM- n° BS-NC-28G- PV-RMa-LOS-A-NTXxNRX-a,b,c,d-1

Matriz medida, sistema DMIMO, n° de BS elegidas, No Correlado, medida a 28 GHz, escenario de medida RMa , con visibilidad directa, escenario de medida A, n° antenas NTX x n° antenas receptoras NRX, antenas elegidas: a,b,c,d, Medida realizada 1.

## 5.2 Análisis realizados.

Nuestro análisis va a ser obtener la capacidad de cada sistema con sus características de propagación, en las diferentes frecuencias de ondas milimétricas, en los diferentes escenarios, y a diferentes distancias entre el transmisor y el receptor. Los análisis realizados en este punto de esta tesis consisten en un primer análisis inicial en el que se compara diferentes sistemas MIMO y DMIMO en diferentes frecuencias, y en los diferentes entornos de propagación con un número de antenas en casos todos los casos de 30 antenas de transmisión y 4 de recepción.

En este análisis se estudian 8 casos.

En primer lugar, se realiza un análisis de sistemas MIMO Masivo en los tres escenarios de propagación, en 3 frecuencias y se calcula la capacidad para estudiar si en los sistemas MIMO influye la frecuencia o el escenario de una forma más importante que otro en la capacidad.

En segundo lugar, se analiza sistemas DM-MIMO, sistemas distribuidos MIMO masivos, en los que se estudian los mismos sistemas con las condiciones de correlado o no correlados, en los 3 escenarios de propagación en diferentes distancias el transmisor y receptor, para estudiar qué parámetro influye más en la capacidad. Lo que se mantiene es el número de antenas totales de transmisión y recepción, 30x4, en todos los casos. Este análisis se repite en las 3 frecuencias de estudio, para analizar si además influye la frecuencia en la capacidad del sistema.

En tercer lugar, se analizan sistemas DM-MIMO en los que se calcula la capacidad para diferentes distancias entre el transmisor y el receptor, y se estudia como varía la capacidad al separar el transmisor y receptor, y especialmente se compara como afecta la visión LOS y NLOS, en diferentes escenarios y en diferentes frecuencias. Son sistemas DMIMO formados por 2BS, de 30x4 antenas en los que la segunda BS se va separando del receptor en cada sistema, para analizar como influye la distancia entre los transmisores y receptores en sistemas DMIMO.

En cuarto lugar, se analiza sistemas diferentes MIMO y DMIMO, 12 en total, en los que se varía los parámetros de los sistemas como correlado o no correlados, en los 3 escenarios de propagación en diferentes distancias el transmisor y receptor, para estudiar qué parámetro influye más en la capacidad. Lo que se mantiene es el número de antenas totales de transmisión y recepción en todos los casos. Este análisis se repite en las 3 frecuencias de estudio, para analizar si además influye la frecuencia en la capacidad del sistema.

En quinto lugar, se analiza sistemas DM-MIMO aumentando el número de antenas transmisoras a 60, estudiando como varia la capacidad en cada frecuencias y escenario.



En sexto lugar, se analiza sistemas MIMO, pero se les aumenta de número de antenas receptoras y se crean diferentes sistemas MIMO cada uno situado a una distancia diferente del transmisor del receptor, y se calcula la capacidad en cada escenario y frecuencia. Se estudia cómo influye en la capacidad el aumento de antenas receptoras y la distancia entre el transmisor y receptor en el equipo móvil de usuario, en cada uno de los escenarios de propagación.

En séptimo lugar, se realiza un análisis de sistemas DMIMO formado por 5 BS con un total de 50 antenas transmisoras y 10 receptoras, en el que se calcula la capacidad de los sistemas a las frecuencias de 10, 28 y 40 GHz en los 3 escenarios de propagación RMA, UMa y UMi. Se compara los valores de capacidad obtenidos en los sistemas correlados, y otro en el que las antenas se eligen separadas, sistema no correlados. Se compara la capacidad obtenida en los diferentes casos, para estudiar qué parámetros influyen más en la capacidad de los sistemas.

Por último, y en octavo lugar, se realiza un análisis de sistemas DMIMO formados cada sistema por 2 BS, en la cual la 1ª BS está a una distancia fija entre el transmisor y el receptor, y la 2ª BS aumenta la distancia progresivamente. Se calcula la capacidad de los diferentes sistemas para los 3 escenarios las 3 frecuencias y en los 2 modos de visibilidad, y se analiza qué parámetro influye más en la capacidad.

### **5.3 Sistemas MIMO-Masivos con 30X4 antenas.**

Se analizan tres sistemas MIMO diferentes, cada uno de ellos a diferentes frecuencias, 28 GHz, 40 GHz y 78 GHz, en los 3 escenarios de propagación UMa, RMa, y UMi.

El sistema analizado es con sistemas de 30 antenas transmisoras y 4 receptoras, 30x4, pero en una sola BS.

Se calcula la capacidad para 7 valores de SINR equiespaciados entre 0 y 35 dB.

Se analizan 3 sistemas MIMO a cada frecuencia en diferentes distancias el transmisor del receptor, donde cada BS tiene 30 antenas.

El primer caso la BS está situada a 10 metros, en el segundo caso a 50 metros y en el tercer caso a 75 metros del receptor. Y se analiza cómo afecta la capacidad a la distancia entre el transmisor y el receptor.

La capacidad obtenida es comparada con la capacidad teórica que es el valor máximo.

Para cada uno de los tres sistemas MIMO formado por las diferentes distancias, se calcula la capacidad para cada uno de los 3 escenarios, UMa, UMi y RMa, y esto se repite para cada una de las 3 frecuencias.

Todos los análisis se repiten a 28 GHz, 40 GHz y 78 GHz.

Los análisis se nombrarán del 1 al 9 para cada escenario y distancia. Y con la letra A, B o C según la frecuencia.

Así los análisis realizados en la frecuencia 28 GHz será análisis A, los análisis realizados en la frecuencia 40 GHz será análisis B y los análisis realizados en la frecuencia 78 GHz será análisis C.

Sistema MIMO formado por 1 BS con 30 antenas cada una. Cada una de las BS está situada a una distancia diferente.

Cada Matriz  $H(i)$  obtenida está formada por 1 BS situadas a diferentes distancias. Analizo la capacidad en diferentes entornos de propagación (RMa, UMa, UMi) a cada frecuencia. La tabla 5.6 presenta las BS elegidas, la distancia que se encuentra cada BS del receptor, y las antenas elegidas en cada BS.

ANTENAS TRANSMISORAS	1:30	1:30	1:30
	BS1	BS1	BS1
	Distancia 10 m	Distancia 50 m	Distancia 75 m

**Tabla 5-6. Antenas elegidas. HS-SM-30x4**

5.3.1 Análisis a 28 GHz, 3 escenarios

El sistema se nombrará como HS-SM-28G-30x4.

Indica un sistema obtenido a través de matriz simulada, HS. Sistema MIMO, SM. Análisis a 28 GHz. 30 antenas transmisoras x 4 antenas receptoras.

Análisis a 28 GHz

Tabla 5.7, de los sistemas MIMO analizados.

SISTEMA	DISTANCIA (metros)	ESCENARIO	VISIBILIDAD
SISTEMA A 1	10	RMa	NLOS
SISTEMA A 2	50	RMa	NLOS
SISTEMA A 3	75	RMa	NLOS
SISTEMA A 4	10	UMa	NLOS
SISTEMA A 5	50	UMa	NLOS
SISTEMA A 6	75	UMa	NLOS
SISTEMA A 7	10	UMi	LOS
SISTEMA A 8	50	UMi	LOS
SISTEMA A 9	75	UMi	LOS

**Tabla 5-7. Sistemas analizados HS-SM-28G-UMi-30x4**

Figuras de las capacidades que se obtienen en las 3 frecuencias para cada uno de los escenarios. Se presenta también la diferencia entre el valor teórico máximo y el de la capacidad en el escenario RMa.

Se presentan las figuras de tamaño reducido y juntas de dos en dos, porque la información que se desprende de ellas se puede apreciar en el tamaño elegido, y así se pueden comparar mejor unas con otras.

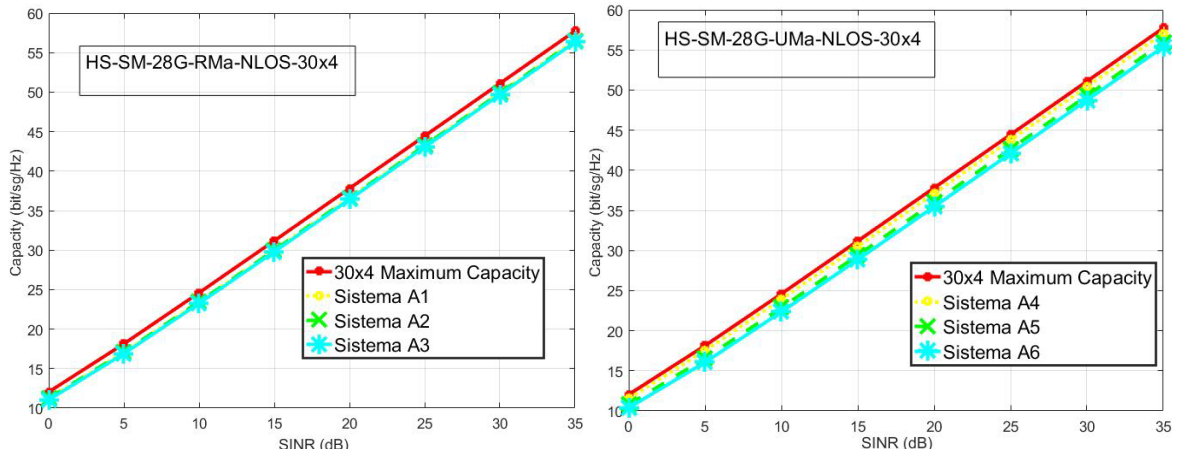


Figura 5-1. Resultados de capacidad. HS-SM-28G-RMa-UMa-NLOS-30x4

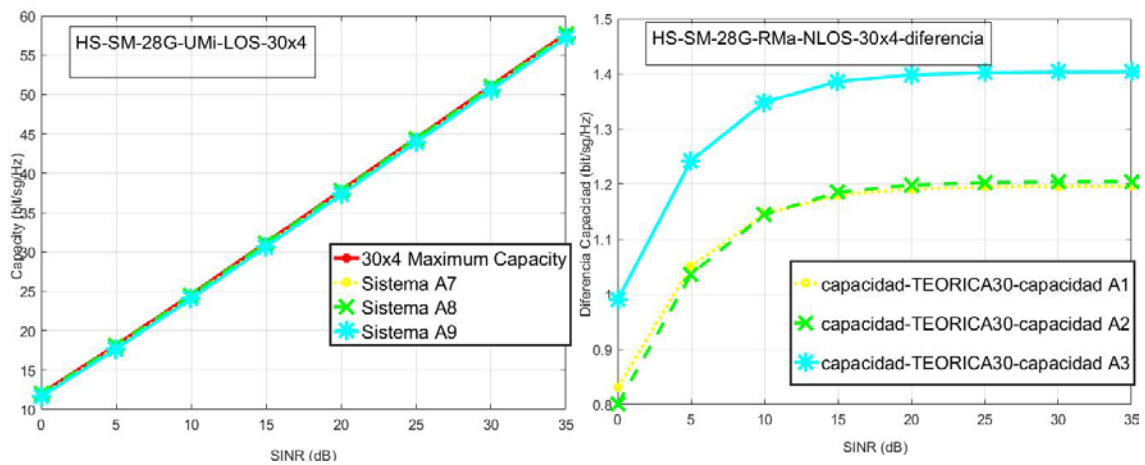


Figura 5-2. Resultados de capacidad. HS-SM-28G-UMi- diferencia RMa valor teórico-30x4

La figura 5.1 presenta la capacidad en los sistemas RMa, la figura 5.2 presenta la capacidad en los sistemas UMa, la figura 5.3 presenta la capacidad en los sistemas UMi, y la figura 5.4 presenta el decremento de capacidad que existe en el caso RMa con respecto al máximo teórico. Conforme aumenta la SINR aumenta la capacidad en los 3 escenarios. Las capacidades obtenidas en los 3 escenarios son parecidas, y por ello se presenta en figuras pequeñas, ya que no hay mucha información diferente entre una y otras.

En los 3 escenarios los valores de capacidad próximos al valor teórico.

En los 3 escenarios analizados, los valores de capacidades obtenidas en las diferentes distancias entre los sistemas MIMO, no son apenas diferentes. Se presenta la figura de la diferencia entre el valor teórico máximo y el valor de la capacidad en el escenario RMa y se observa que, en el caso peor, cuando el transmisor y receptor están más alejados, a 75 metros, el valor diferencia de la capacidad es 1,4 Bits/sg/Hz. Muy pequeño. Tan solo se presenta la diferencia respecto al escenario RMa, ya que los valores para los otros escenarios son similares.

### 5.3.2 Análisis a 40 GHz, 3 escenarios

El sistema se nombrará como HS-SM-40G-30x4.

Indica un sistema obtenido a través de matriz simulada, HS. Sistema MIMO, SM. Análisis a 40 GHz. 30 antenas transmisoras x 4 antenas receptoras.

Se repiten los análisis anteriores a la frecuencia de 40 GHz.

Tabla 5.8 de los sistemas MIMO analizados.

SISTEMA	DISTANCIA (metros)	ESCENARIO	VISIBILIDAD
SISTEMA B 1	10	RMa	NLOS
SISTEMA B 2	50	RMa	NLOS
SISTEMA B 3	75	RMa	NLOS
SISTEMA B 4	10	UMa	NLOS
SISTEMA B 5	50	UMa	NLOS
SISTEMA B 6	75	UMa	NLOS
SISTEMA B 7	10	UMi	LOS
SISTEMA B 8	50	UMi	LOS
SISTEMA B 9	75	UMi	LOS

Tabla 5-8. Sistemas analizados HS-SM-40G-30x4

Figura de las capacidades que se obtienen en las 3 frecuencias para cada uno de los escenarios.

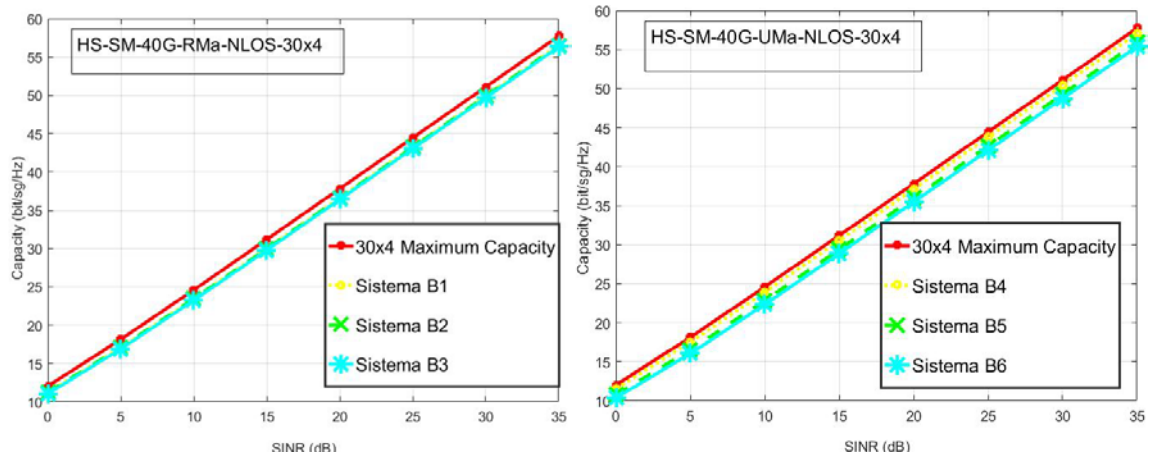


Figura 5-3. Resultados de capacidad. HS-SM-40G-RMa-UMa-NLOS-30x4

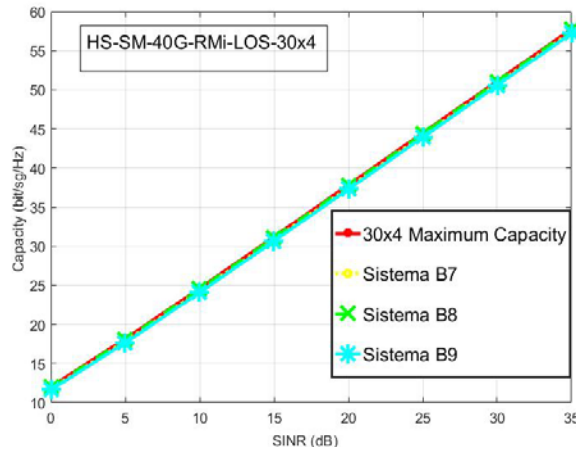


Figura 5-4. Resultados de capacidad. HS-SM-40G-UMi-LOS-30x4

La figura 5.3 presenta la capacidad en los sistemas RMa, y los sistemas UMa, la figura 5.4 presenta la capacidad en los sistemas UMi. No hay una diferencia apreciable con respecto a los resultados a 28 GHz. Las capacidades no varían al analizar los sistemas a 40 GHz o a 28 GHz. Se obtienen los mismos valores de capacidad para la frecuencia de 40 GHz, en los 3 escenarios.

### 5.3.3 Análisis a 78 GHz, 3 escenarios

El sistema se nombrará como HS-SM-78G-30x4.

Indica un sistema obtenido a través de matriz simulada, HS. Sistema MIMO, SM. Análisis a 40 GHz. 30 antenas transmisoras x 4 antenas receptoras.

Se repiten los análisis a la frecuencia de 78 GHz.

Tabla 5.9 de los sistemas MIMO analizados.

SISTEMA	DISTANCIA (metros)	ESCENARIO	VISIBILIDAD
SISTEMA C 1	10	RMa	NLOS
SISTEMA C 2	50	RMa	NLOS
SISTEMA C 3	75	RMa	NLOS
SISTEMA C 4	10	UMa	NLOS
SISTEMA C 5	50	UMa	NLOS
SISTEMA C 6	75	UMa	NLOS
SISTEMA C 7	10	UMi	LOS
SISTEMA C 8	50	UMi	LOS
SISTEMA C 9	75	UMi	LOS

Tabla 5-9. Sistemas analizados HS-SM-78G-30x4

Figura 5.5 de las capacidades que se obtienen en las 3 frecuencias para cada uno de los escenarios.

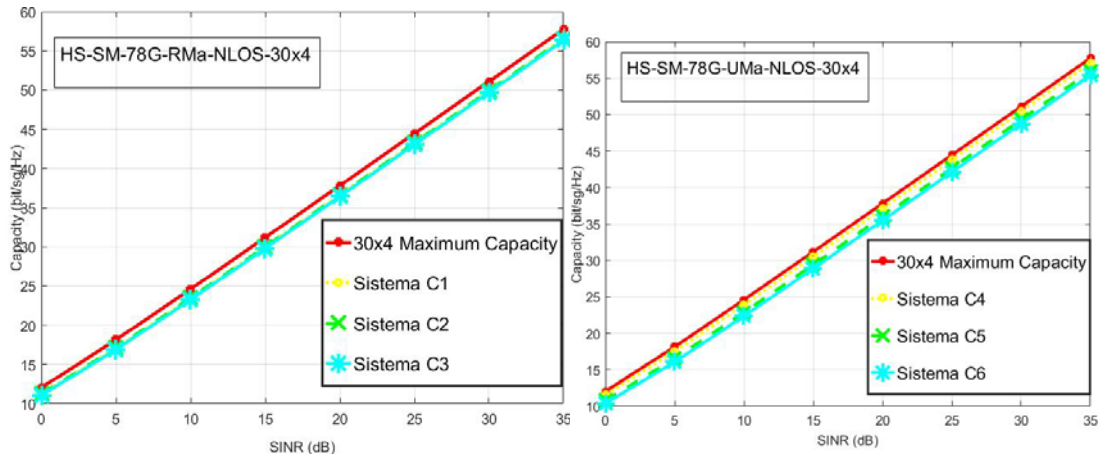


Figura 5-5. Resultados de capacidad. HS-SM-78G-RMa- UMa-NLOS-30x4

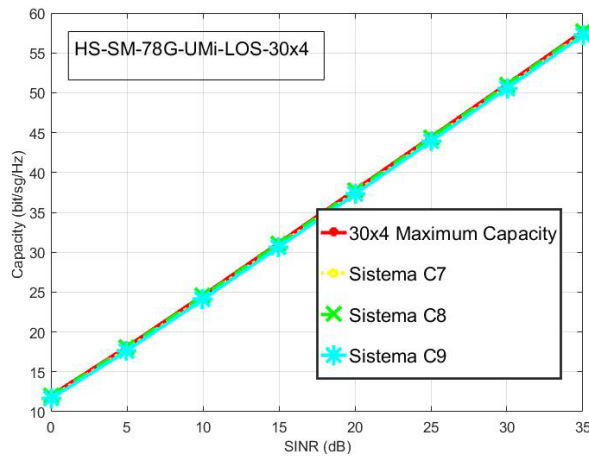


Figura 5-6. Resultados de capacidad. HS-SM-78G-UMi-LOS-30x4

La figura 5.5 presenta la capacidad en los sistemas RMa, y los sistemas UMa, la figura 5.6 presenta la capacidad en los sistemas UMi. No se observan valores diferentes de capacidad en función de utilizar una frecuencia u otra mayor. Tan solo que en el entorno UMi depende menos de la distancia a la que se encuentre cada BS del receptor, para las 3 frecuencias analizadas, ya que las líneas de las figuras están muy próximas al valor teórico. En los otros escenarios las líneas se separan algo del valor teórico dependiendo de la distancia entre el transmisor y el receptor en los sistemas MIMO.

#### 5.4 Análisis sistema DM-MIMO. 30x4

En primer lugar, se analizan sistemas DM-MIMO en los que se varía el número de antenas en cada BS, para estudiar cómo influye en la capacidad, el número de antenas elegidas en cada BS y se analiza si influye que los sistemas estén correlados, para el mismo número de antenas. Estos análisis se realizan en los 3 escenarios y en las 3 frecuencias, y para cada uno de ellos se calcula la capacidad, para analizar si alguno de estos parámetros influye más que otros en la capacidad del sistema

El sistema se nombrará como HS-DM-SDM-3BS-30X4

Indica un sistema obtenido a través de matriz simulada, HS. Sistema Distribuido MIMO Masivo, DM-SDM. Sistema con 3BS. 30 antenas transmisoras x 4 antenas receptoras.

A partir de las matrices H obtenidas de las simulaciones de los canales de propagación, se analiza tres sistemas DMIMO diferentes, cada uno de ellos a diferentes frecuencias.

En todos los sistemas se utilizan 30 antenas transmisoras y 4 antenas receptoras, y se obtiene la capacidad para 7 valores de SINR equiespaciados entre 0 y 35 dB.

Todos los sistemas DMIMO está formado por 3 BS situados la primera BS a 10 metros, la segunda BS a 50 metros y la tercera BS a 75 metros del receptor.

Los análisis se realizan en los 3 escenarios de propagación: UMa, UMi, RMa.

La capacidad obtenida es comparada con la capacidad teórica que es el valor máximo.

Todos los análisis se realizan a diferentes frecuencias, 28 GHz, 40 GHz y 78 GHz, para cada escenario.

Se realizan 3 análisis diferentes:

- Sistema DMIMO con 10 antenas en cada de las 3 BS transmisoras. Sistemas 30x4 correlado. Se llamará sistemas D(i).
- Sistema DMIMO con 10 antenas en cada una de las 3 BS transmisoras. Sistemas 30x4, NO correlado. Se llamará sistemas E(i).
- Comparativa entre los sistemas correlados y no correlados.

#### 5.4.1 Sistema DM-MIMO 30x4. Correlado.

El sistema se nombrará como HS-DM-SDM-3BS-30X4

Indica un sistema obtenido a través de matriz simulada, HS. Sistema Distribuido MIMO Masivo, DM-SDM. Sistema con 3BS. 30 antenas transmisoras x 4 antenas receptoras.

Sistema DM-DMIMO formado por 3 BS con 10 antenas cada una. Cada una de las BS está situada a una distancia diferente. En total tengo un sistema DM- DMIMO de 30 antenas transmisoras y 4 antenas receptoras.

SISTEMA A1. (30X4). DMIMO

La tabla 5.10 presenta las BS elegidas, la distancia que se encuentra cada BS del receptor, y las antenas elegidas en cada BS.

ANTENAS TRASNISORAS	1:10	1:10	1:10
	BS1	BS2	BS3
	Distancia 10 m	Distancia 50 m	Distancia 75 m

**Tabla 5-10. Antenas elegidas. HS-SDM-3BS-30x4-A1**

Cada Matriz H(i) obtenida está formada por 3 BS situadas a diferentes distancias, 10, 50 Y 75 metros.

En cada uno de los análisis se comparan 3 casos diferentes formados por diferentes las capacidades obtenidas en diferentes escenarios.

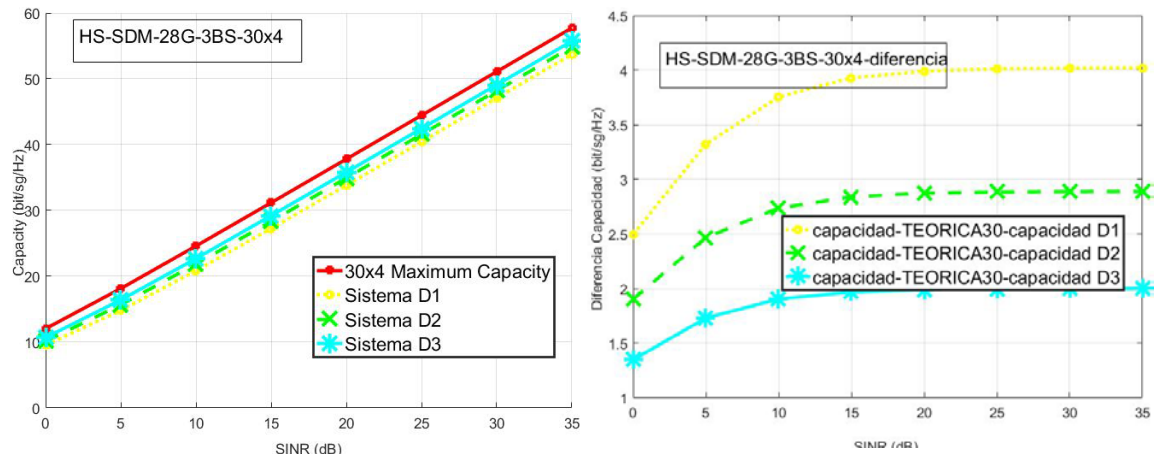
Tabla 5.11 de los sistemas analizados.

SISTEMA	ESCENARIO	VISIBILIDAD	FRECUENCIA
SISTEMA D1	RMa	NLOS	28 GHz
SISTEMA D2	UMa	NLOS	28 GHz
SISTEMA D3	UMi	LOS	28 GHz
SISTEMA D4	RMa	NLOS	40 GHz
SISTEMA D5	UMa	NLOS	40 GHz
SISTEMA D6	UMi	LOS	40 GHz
SISTEMA D7	RMa	NLOS	78 GHz
SISTEMA D8	UMa	NLOS	78 GHz
SISTEMA D9	UMi	LOS	78 GHz

**Tabla 5-11. Escenarios analizados. HS-SDM-3BS-30x4-A1**

Se repite el análisis para cada una de las tres frecuencias mencionadas anteriormente.

5.4.1.1 Análisis a 28 GHz



**Figura 5-7. Resultados de capacidad. HS-SDM-28G-diferencia-3BS-30x4**

Se observa en la figura 5.7 la capacidad en los 3 escenarios a frecuencia de 28 GHz, y el decremento de los valores teóricos máximos con respecto a los valores de capacidad en los 3 escenarios. Se observan valores muy parecidos en los 3 casos. El escenario de propagación que se utilice, UMA, UMi o RMa no influye mucho en la capacidad en este caso.

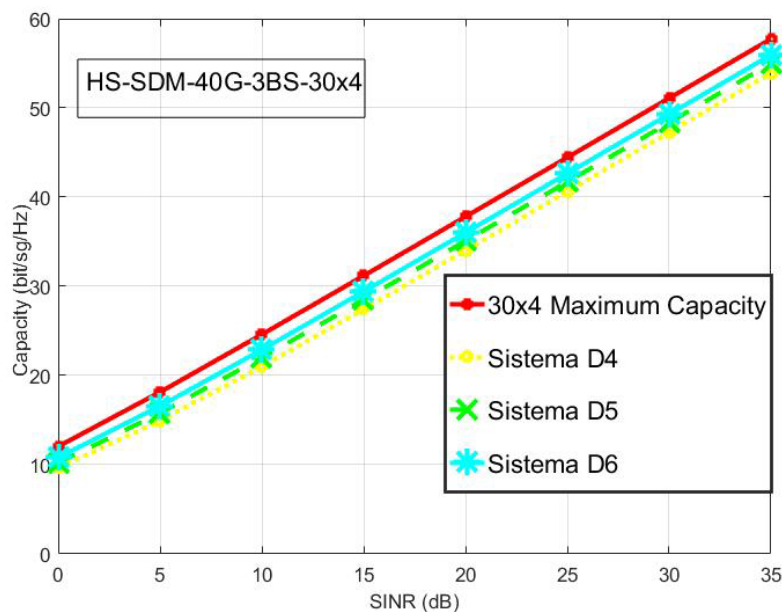


Como los diferentes valores no son fácilmente apreciables, se representa la diferencia de la capacidad con respecto a cada caso.

El sistema D3 tiene mayor capacidad, luego el sistema D2 y por último el D1. Lo cual indica mejor comportamiento de escenario UMi frente a escenario RMa a estas frecuencias y a estas distancias. No obstante, las diferencias entre un escenario y otro son de 2 (bits/sg/Hz)

#### 5.4.1.2 Análisis a 40 GHz

Se repite el análisis de los mismos escenarios, a las otras frecuencias.



**Figura 5-8. Resultados de capacidad. HS-SDM-40G-3BS-30x4**

Los resultados son prácticamente iguales que a la frecuencia anterior. No hay variaciones de la capacidad al aumentar las frecuencias.

#### 5.4.1.3 Análisis a 78 GHz

Se repiten los análisis a la siguiente frecuencia de trabajo.

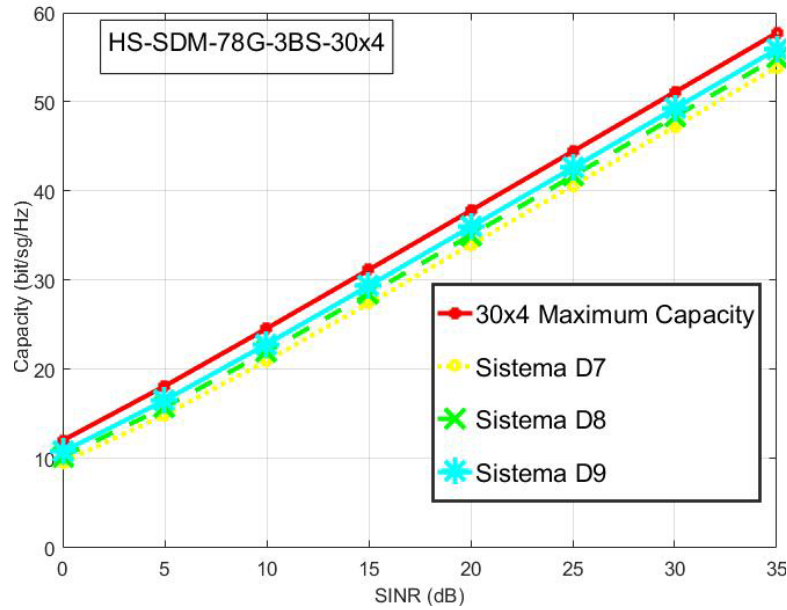


Figura 5-9. Resultados de capacidad. HS-SDM-78G-3BS-30x4

Prácticamente no hay diferencia a trabajar en una frecuencia u otra. Lógicamente el valor mejor es el ideal, luego el escenario UMi, UMa y luego el RMa, para las 3 bandas de frecuencias. Sí hay que tener en cuenta, que el sistema 3 en las 3 frecuencias es con visibilidad directa, LOS, y eso mejora la capacidad del sistema. No hay ninguna mejora apreciable en utilizar una u otra frecuencia en los análisis realizados para sistemas DMIMO de 3 BS, con 10 antenas en cada BS.

#### 5.4.2 Sistema DM-MMO 30x4 no correlado.

El sistema se nombrará como HS-DM-SDM-NC-3BS-30X4- Indica un sistema obtenido a través de matriz simulada, HS. Sistema Distribuido MIMO Masivo, DM-SDM. Sistema no correlado, NC. Sistema con 3BS. 30 antenas transmisoras x 4 antenas receptoras. Análisis D1

Se repite los análisis del apartado anterior, pero utilizando antenas separadas dentro de cada BS, de forma que las antenas no estén correladas. Se eligen las antenas transmisoras en intervalos de 5 antenas de 1 a 50. Total 10 antenas en cada BS. Se toman valores de antenas transmisoras espaciadas 5 antenas en cada una. Este análisis con 10 antenas no correladas en cada BS lo llamo A3.

Sistema DMIMO formado por 3 BS con 10 antenas cada una.

#### SISTEMA (30X4). DMIMO

ANTENAS TRASNMISORAS	1:5:50	1:5:50	1:5:50
	BS1	BS2	BS3
	Distancia 10 m	Distancia 50 m	Distancia 75 m

Tabla 5-12. Antenas elegidas. HS-SDM-3BS-NC-30x4

Los sistemas no correlados se identificarán como E(i)

Se repite el análisis sobre los mismos escenarios anteriores. En la tabla 5.13 se detallan cada uno de los análisis, que se comparan 3 casos diferentes formados por diferentes las capacidades obtenidas en diferentes escenarios.

SISTEMA	ESCENARIO	VISIBILIDAD	FRECUENCIA	SISTEMAS NO CORRELADOS
SISTEMA E1	RMa	NLOS	28 GHz	NC
SISTEMA E2	UMa	NLOS	28 GHz	NC
SISTEMA E3	UMi	LOS	28 GHz	NC
SISTEMA E4	RMa	NLOS	40 GHz	NC
SISTEMA E5	UMa	NLOS	40 GHz	NC
SISTEMA E6	UMi	LOS	40 GHz	NC
SISTEMA E7	RMa	NLOS	78 GHz	NC
SISTEMA E8	UMa	NLOS	78 GHz	NC
SISTEMA E9	UMi	LOS	78 GHz	NC

Tabla 5-13. Escenarios analizados. HS-SDM-3BS-NC-30x4

Se repite el análisis para cada una de las tres frecuencias mencionadas anteriormente.

5.4.2.1 Análisis a 28 GHz

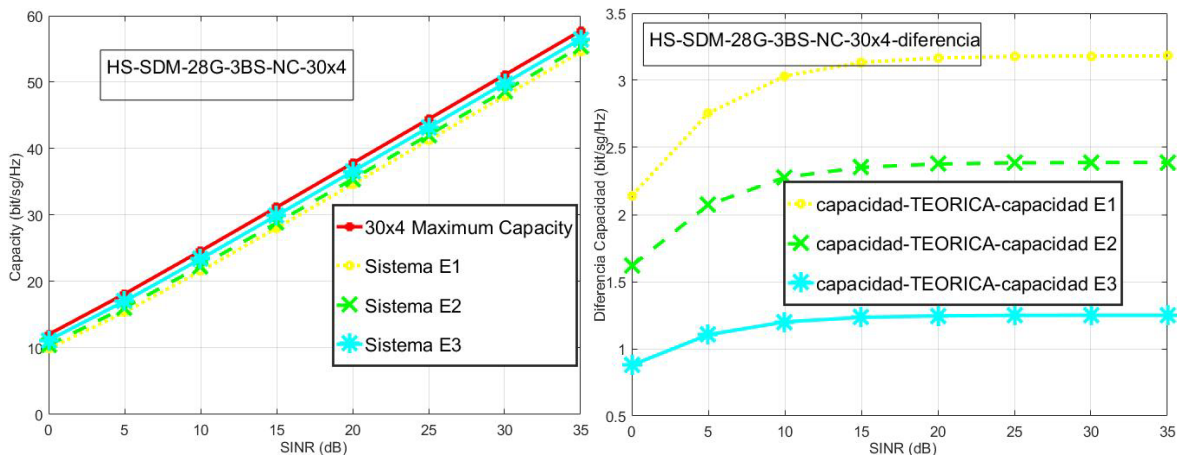


Figura 5-10. Resultados de capacidad. HS-SDM-diferencia-28G-3BS-NC-30x4

Se observa en la figura 5.10 la capacidad en los 3 escenarios a frecuencia de 28 GHz, y el decremento de los valores teóricos máximos con respecto a los valores de capacidad en los 3 escenarios. No se observa que la capacidad en valores totales varíe mucho respecto al sistema del punto anterior, correlado. Esto implica que cuando se trabaja con sistemas DM-DMIMO con varias BS no incluye mucho las antenas elegidas dentro de cada BS.

Como los valores no son fácilmente apreciables, también se representa la diferencia de la capacidad con respecto a cada caso.

El sistema E3 tiene mayor capacidad, luego el sistema E2 y por último el E1. Lo cual es lógico.

La capacidad mejora algo comparado con el sistema D1, de 30x4 antenas, correlado. Al disminuir la correlación, la capacidad aumenta, pero en apenas un 1 bit/Hz/sg

5.4.2.2 Análisis a 40 GHz

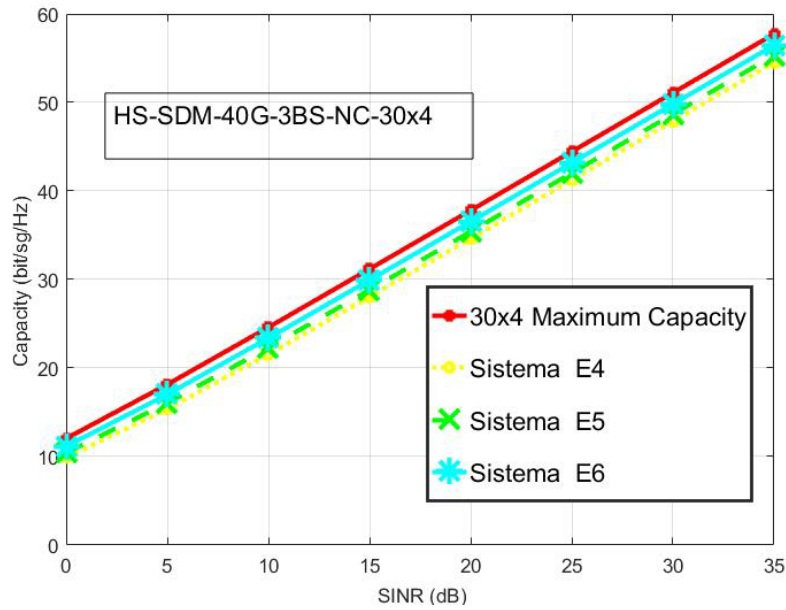
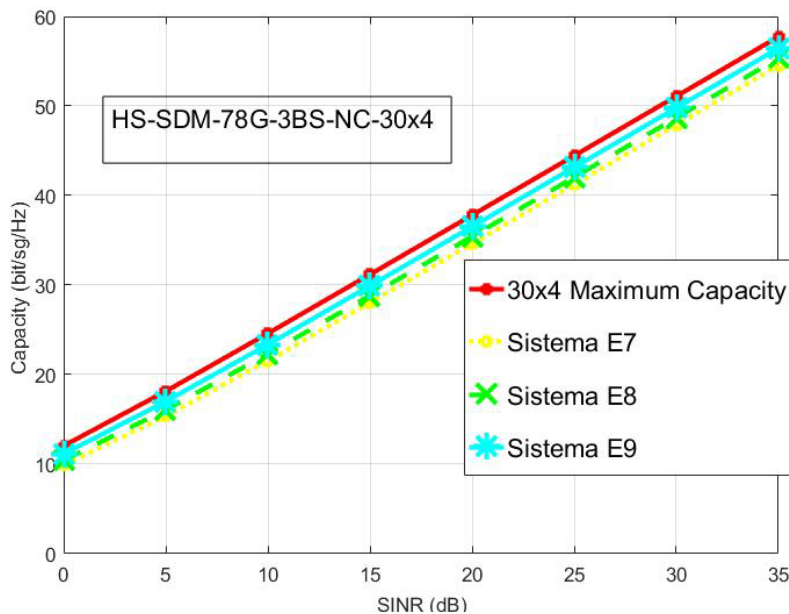


Figura 5-11. Resultados de capacidad. HS-SDM-40G-3BS-NC-30x4

No se aprecia una variación importante al subir en frecuencia respecto a la figura 5.11 anterior. Se repite el análisis a la frecuencia superior.

5.4.2.3 Análisis a 78 GHz



**Figura 5-12. Resultados de capacidad. HS-SDM-78G-3BS-NC-30x4**

No se aprecia una mejora importante en el caso de las antenas no correladas. Esto es normal al usar sistemas DMIMO con diferentes BS.

Tampoco se aprecia que mejore mucho en general en ninguno de los tres sistemas estudiados el usar una u otra frecuencia. Es decir, al subir en frecuencia no mejoramos la capacidad en este estudio.

#### 5.4.3 Comparativa DMIMO correlados y no correlados

El sistema se nombrará como HS-DM-SDM-3BS-30X4

Indica un sistema obtenido a través de matriz simulada, HS. Sistema Distribuido MIMO Masivo, DM-SDM. Sistema con 3BS. 30 antenas transmisoras x 4 antenas receptoras.

Se analizará en este apartado cómo varía la capacidad entre un sistema con una correlación alta o baja.

Para ello se estudian 2 casos, un sistema DMIMO, eligiendo las antenas contiguas, es decir, correlado, y otro sistema DMIMO no correlado.

Se analiza la capacidad para los tres escenarios de trabajo, UMa, RMa y UMi, y en las tres frecuencias: 28GHz, 40 GHz y 78 GHz.

Se toman 7 valores de SINR entre 0 y 35 dB.

El sistema DMIMO se forma con 3 BS, situadas a 10m, 50m y 75 m del receptor.

De cada BS se toman 10 antenas. En total 30 antenas. Sistema 30x4.

En el sistema correlado se toman las antenas de la 1 a la 10.

En el sistema no correlado se toman las antenas 1:5:10.

Se repite el estudio para cada escenario.

Cada sistema analizado se nombrará como F(i)

Tabla 5.14 de sistemas analizados.

SISTEMA	FRECUENCIA	CORRELACIÓN	ESCENARIO
Sistema F1	28GHz	correlado	RMa
Sistema F2	28GHz	no correlado	RMa
Sistema F3	40GHz	correlado	RMa
Sistema F4	40GHz	no correlado	RMa
Sistema F5	78GHz	correlado	RMa
Sistema F6	78GHz	no correlado	RMa
Sistema F7	28GHz	correlado	UMa
Sistema F8	28GHz	no correlado	UMa
Sistema F9	40GHz	correlado	UMa
Sistema F10	40GHz	no correlado	UMa
Sistema F11	78GHz	correlado	UMa

Sistema F12	78GHz	no correlado	UMa
Sistema F13	28GHz	correlado	UMi
Sistema F14	28GHz	no correlado	UMi
Sistema F15	40GHz	correlado	UMi
Sistema F16	40GHz	no correlado	UMi
Sistema F17	78GHz	correlado	UMi
Sistema F18	78GHz	no correlado	UMi

Tabla 5-14. Sistemas analizados. HS-DM-SDM-3BS-30x4

5.4.3.1 Análisis en el escenario RMa

El sistema se nombrará como HS-DM-SDM-3BS-RMa-30x4.

Indica un sistema obtenido a través de matriz simulada, HS. Sistema Distribuido MIMO Masivo, DM-SDM. Sistema con 3BS. Escenario RMa. 30 antenas transmisoras x 4 antenas receptoras.

Se analiza en el entorno de propagación RMa y se calcula la capacidad para cada frecuencia, en sistema correlado y no correlado.

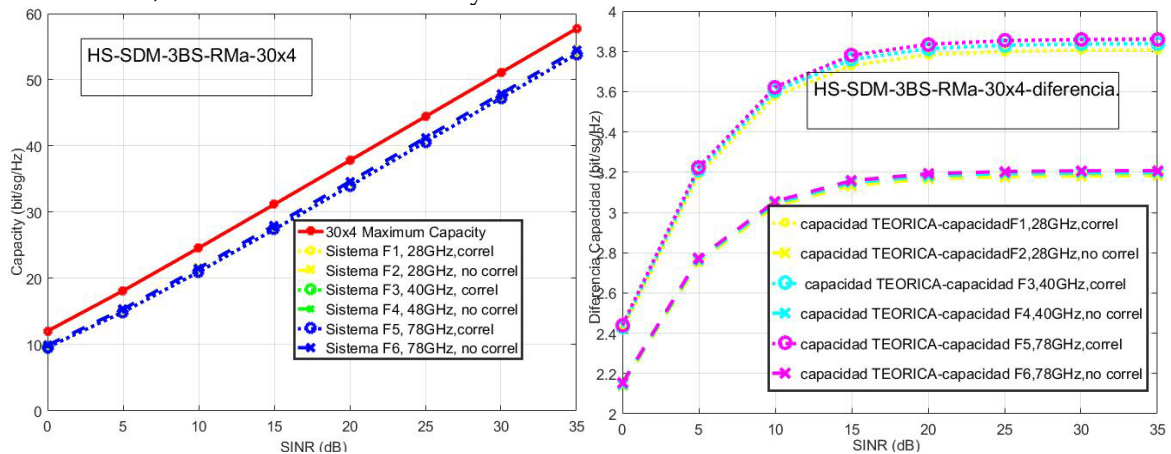


Figura 5-13. Resultados de capacidad. HS-SDM-3BS-RMa-diferencia-30x4

En la figura 5.13 de las capacidades en el escenario RMa, y la diferencia del valor teórico con respecto a cada una de las capacidades del escenario RMa, se aprecia que todas las capacidades son parecidas, y difieren un poco de la teórica. Las líneas azules están encima de las líneas amarillas y verdes. Es decir, la capacidad es la misma independiente de la frecuencia.

Para ver mejor esa diferencia, también se presenta la diferencia respecto la capacidad teórica.

En las 3 frecuencias diferentes, se observa que se comporta mejor el sistema no correlado que el correlado, en todas las frecuencias. No obstante, la diferencia entre los dos tipos de sistemas, correlados y no correlados, es apenas 1,8 bits/sg/Hz

5.4.3.2 Análisis en el escenario UMa

El sistema se nombrará como HS-DM-SDM-3BS-UMa-30x4.

Indica un sistema obtenido a través de matriz simulada, HS. Sistema Distribuido MIMO Masivo, DM-SDM. Sistema con 3BS. Escenario UMa. 30 antenas transmisoras x 4 antenas receptoras.

Se analiza en el entorno de propagación UMa y se calcula la capacidad para cada frecuencia, en sistema correlado y no correlado.

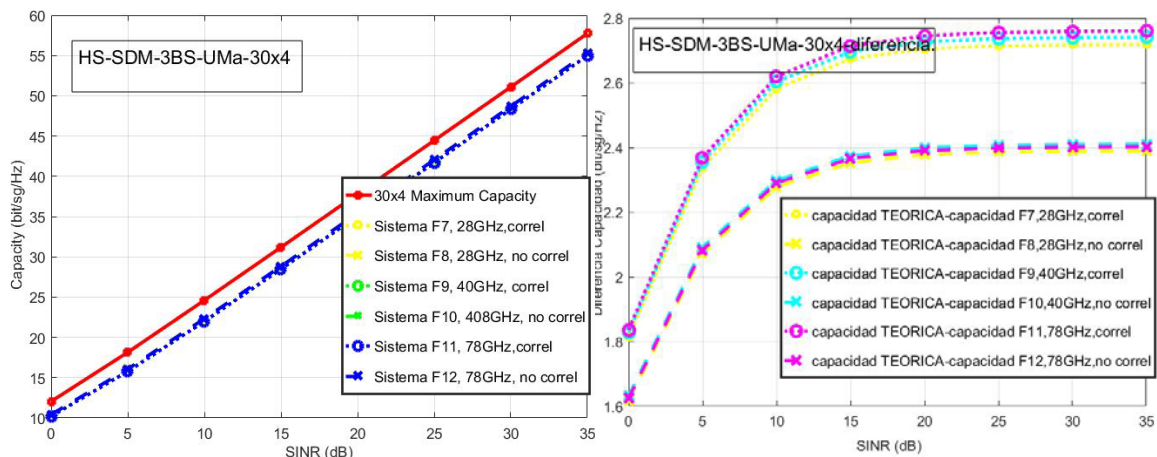


Figura 5-14. Resultados de capacidad. HS-SDM-3BS-UMa-diferencia-30x4

La figura 5.14 es la misma que la del escenario RMa, pero ahora la capacidad es un poco mayor. Así en el escenario RMa había una capacidad de 53 bits/sg/Hz, para una SINR de 35 dB, y ahora es de 55 bits/sg/Hz.

Para ver mejor esa diferencia, se presenta la diferencia respecto la capacidad teórica. El sistema en el escenario UMa se comporta mejor que en el escenario RMa, bajando la diferencia con respecto al valor teórico, de 3,8 bits/sg/Hz a menos de 2,8 bits/sg/Hz. Se sigue cumpliendo que los sistemas No Correlados tiene mayor capacidad que los no correlados.

5.4.3.3 Análisis en el escenario UMi

El sistema se nombrará como HS-DM-SDM-3BS-UMi-30x4.

Indica un sistema obtenido a través de matriz simulada, HS. Sistema Distribuido MIMO Masivo, DM-SDM. Sistema con 3BS. Escenario UMi. 30 antenas transmisoras x 4 antenas receptoras.

Se analiza en el entorno de propagación UMi y se calcula la capacidad para cada frecuencia, en sistema correlado y no correlado.



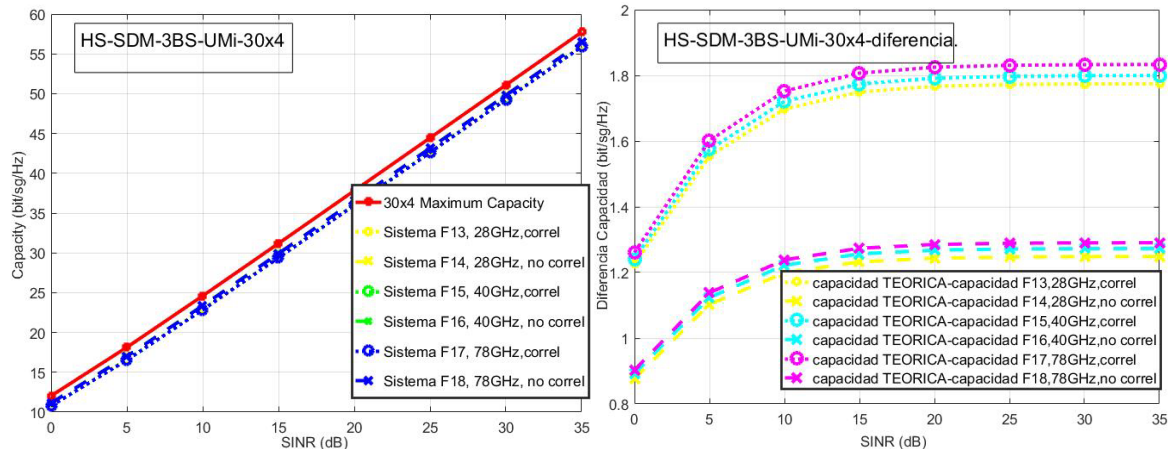


Figura 5-15. Resultados de capacidad. HS-SDM-3BS-UMi-diferencia-30x4

Se observa en la figura 5.15, que la capacidad en este escenario UMi es algo mejor que el escenario anterior, UMa.

Para observar mejor la diferencia se presenta la siguiente figura con los valores de la diferencia respecto la capacidad teórica.

Y este caso es aún mejor que el anterior, bajando a 1,8 la diferencia con respecto al valor teórico. Pero se mantiene que los sistemas no correladas tiene mayor capacidad que los correlados, aunque la diferencia no es grande.

### 5.5 Análisis sistema DM-MIMO. Estudio del parámetro de visibilidad.

En este análisis se analiza la capacidad para un sistema MIMO distribuido de 30 antenas transmisoras y 4 antenas receptoras.

Se realiza el análisis en los diferentes escenarios, en sistemas DMIMO, RMa, UMa, y UMi, en visión LOS y NLOS, para 10, 28 y 40 GHz, en las distancias de 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 y 100 metros.

Para todos los sistemas las mismas antenas receptoras

15 antenas transmisoras elegidas de 1:15 en cada BS, tomo 2 BS, en total 30 antenas transmisoras.

Número de localizaciones 10.

Distancias entre las antenas tx, 0,1;; Distancias entre las antenas receptoras 0,1.

Ancho del lóbulos: 10°.

PARA  $d_{tx}=d_{rx}=1$ ,  $\theta_h=10$

Solo tomo 1 valor de SINR. solo evalúo a una frecuencia

Cada sistema DMIMO estará formado por 2 BS.

Se evalúan 8 sistemas DMIMO, formado cada uno por 2 BS, la primera BS situada a 10 metros del receptor y la segunda BS va variando la distancia al receptor desde los 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 y 100 metros, de forma que la combinación de la BS1 (a



10 metros) con cada una de las otras BS me da lugar a 8 sistemas diferentes, en función de la separación a que se encuentra la segunda BS.

Según esto, tengo 8 matrices  $H_1, \dots, H_8$ , sobre las que se calcula la capacidad.

Se presenta la capacidad media de las 10 localizaciones, CM porque es el indicador que mejor define el comportamiento del sistema.

Se analiza para para cada uno de los 3 escenarios, RMa, UMa, y UMi.

En cada uno de los escenarios se analiza para las 3 frecuencias: 10, 28 y 40 GHz, con visibilidad directa LOS y No directa NLOS.

### 5.5.1 Análisis para el escenario RMa

Se realiza el análisis en el escenario RMa en dos frecuencias, 10 GHz y 28 GHz y en las dos condiciones de propagación, visibilidad directa LOS, y no directa NLOS.

El sistema se nombrará como HS- DM-SDM-2BS-RMa-30x4.

Indica un sistema obtenido a través de matriz simulada, HS. Sistema Distribuido MIMO Masivo, DM-SDM. Sistema con 2BS. Escenario RMa. 30 antenas transmisoras x 4 antenas receptoras.

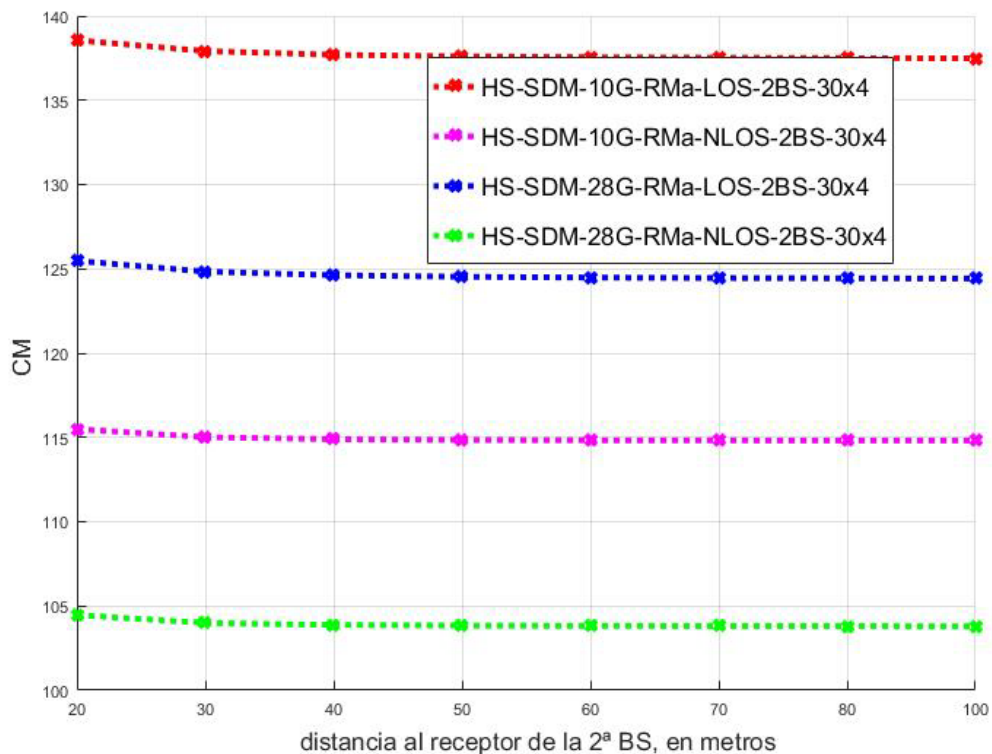


Figura 5-16. Comparativa RMa. HS-SDM-2BS-RMa-30x4

Se observa en la figura 5.16, que la capacidad en el entorno RMa, tanto en propagación LOS como NLOS tiene unos valores aceptables de capacidad, y varía poco al usar la 2ª BS desplazada unos 100 metros del receptor. Apenas baja un punto

de usar una BS cercana u otra alejada. Se observa también que al pasar de LOS a NLOS en las dos frecuencias, 10 GHz y 28 GHz, la capacidad media disminuye unos 20 bit/sg/Hz en las dos frecuencias.

### 5.5.2 Análisis para el escenario UMa

Se realiza el análisis en el escenario UMa en tres frecuencias, 10 GHz 28 GHz y 40 GHz en las dos condiciones de propagación, visibilidad directa LOS, y no directa NLOS.

El sistema se nombrará como HS- DM-SDM-2BS-UMa-30x4.

Indica un sistema obtenido a través de matriz simulada, HS. Sistema Distribuido MIMO Masivo, DM-SDM. Sistema con 2BS. Escenario UMa. 30 antenas transmisoras x 4 antenas receptoras.

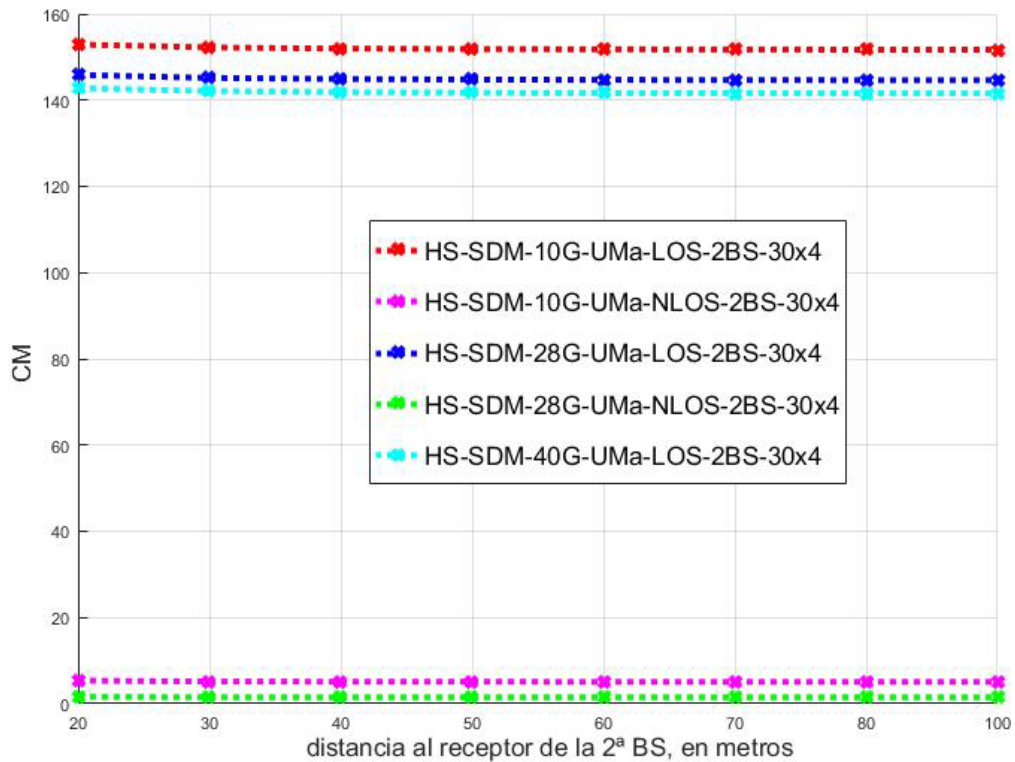


Figura 5-17. Comparativa UMa. HS-SDM-2BS-UMa-30x4

Al igual que en el análisis para el escenario RMa, anterior, la capacidad apenas disminuye al separar la segunda BS. Se observa en la figura 5.17, que los valores de capacidad en visión LOS son un poco mayores que en el escenario RMa, tiene unos valores de capacidad alrededor de 150 Bits/sg/Hz para las 3 frecuencias analizadas. Para visión NLOS, las capacidades disminuyen mucho tanto a la frecuencia de 10 GHz como a 28 GHz, tanto que están por debajo de 10 Bits/sg/Hz.

### 5.5.3 Análisis para el escenario UMi

Se realiza el análisis en el escenario UMi en tres frecuencias, 10 GHz 28 GHz y 40 GHz en las dos condiciones de propagación, visibilidad directa LOS, y no directa NLOS.

El sistema se nombrará como HS- DM-SDM-2BS-UMi-30x4.

Indica un sistema obtenido a través de matriz simulada, HS. Sistema Distribuido MIMO Masivo, DM-SDM. Sistema con 2BS. Escenario UMi. 30 antenas transmisoras x 4 antenas receptoras.

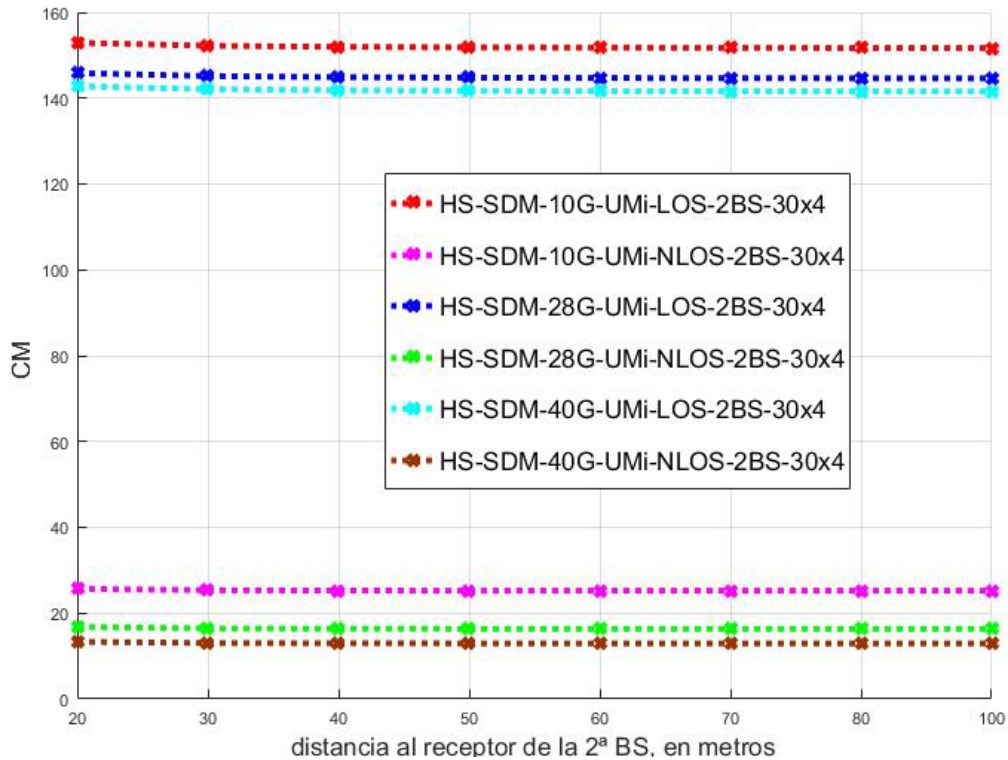


Figura 5-18. Comparativa UMi. HS-SDM-2BS-UMi-30x4

En la figura 5.18, se observa que los valores de capacidad para los casos de visibilidad LOS en las 3 frecuencias son muy parecidos a los valores obtenidos para el escenario UMa, anterior. En cambio, en los casos de visibilidad NLOS, aunque también disminuyen mucho, como en el escenario anterior, los valores de capacidad no son tan bajos, así para el caso de frecuencia 10 GHz, NLOS, el valor de capacidad oscila por unos 25 bits/sg/Hz para todas las distancias.

#### 5.5.4 Comparación diferentes escenarios y visibilidad.

Se presenta las figuras en las que se compara la capacidad para los 3 escenarios en visibilidad directa LOS y no directa NLOS, para la frecuencia de 10 GHz, ya que según se observa de las figuras anteriores de este análisis, al aumentar las frecuencias en los 3 escenarios, las capacidades disminuyen en los 3 casos de forma parecida.

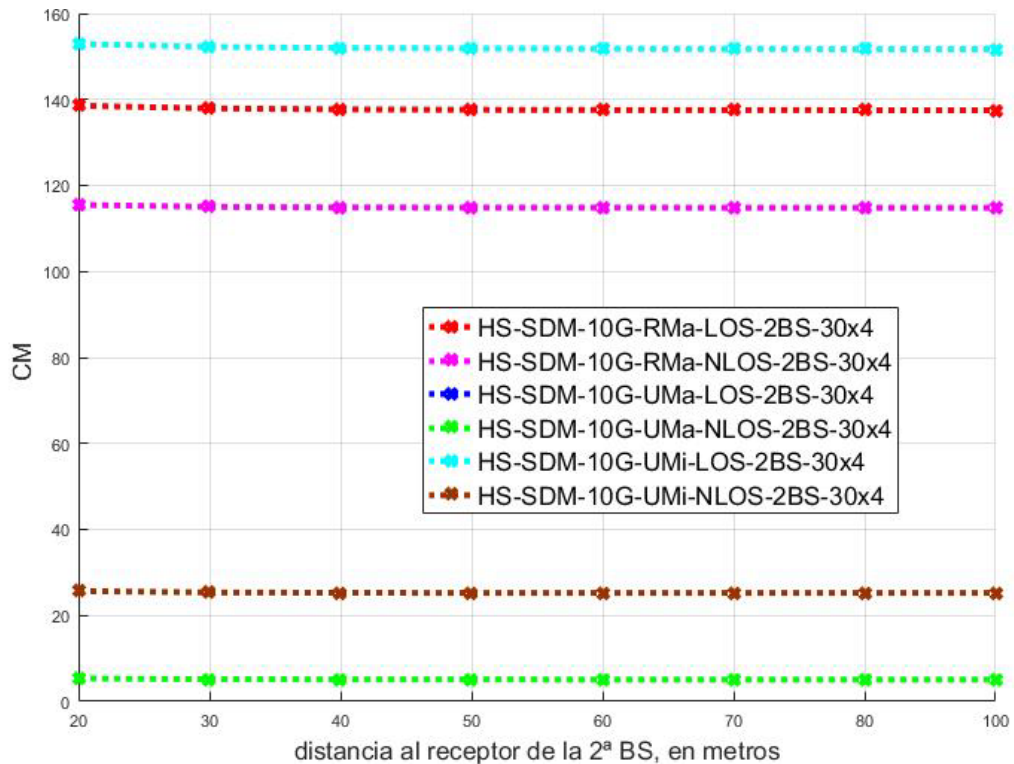


Figura 5-19. Comparativa escenarios y visibilidad. HS-SDM-2BS-30x4

Los valores de capacidad en los escenarios UMa y UMi, para visibilidad LOS, son los mismos, y una línea está sobre la otra. Para el escenario RMa, LOS, la capacidad disminuye un poco, algo más de 10 Bits/sg/Hz. En visibilidad no directa, NLOS, en el escenario RMa, la capacidad disminuye un poco, unos 20 Bits/sg/Hz, pero sigue estando alta, unos 118 bit/Hz/sg. En cambio, para los escenarios UMa y UMi, en visibilidad NLOS, la capacidad disminuye mucho, especialmente en el escenario UMa.

### 5.6 Comparativa de sistemas MIMO y DMIMO

El sistema se nombrará como HS-SM-SDM-30x4

Indica un sistema obtenido a través de matriz simulada, HS. Sistema MIMO. Sistema Distribuido MIMO Masivo, DM-SDM. 30 antenas transmisoras x 4 antenas receptoras.

En este análisis se compara 4 entornos de sistemas:

Se analizan 2 sistemas MIMO y 2 sistemas DMIMO.

Los sistemas DMIMO están formados por 3 BS situadas a diferentes distancias, 10, 50 y 75 metros. Se analiza dos casos, DMIMO y MIMO:

Los sistemas DMIMO están formados por:

1. Un sistema DMIMO correlado, elegidas las antenas unas a continuación de la otras.

2. Un sistema DMIMO no correlado, con las antenas elegidas dentro de cada BS separadas, para que disminuya la correlación. Se varia la distancia y la antena.

Los sistemas MIMO están formados por:

3. Una BS situada a 10 metros, el TX del RX
4. Una BS situada a 75 metros, el TX del RX

Todo ello se analiza en diferentes entornos de propagación, LOS y NLOS diferentes frecuencias 28, 40 y 78 GHz, y en los 3 escenarios RMa, UMa y UMi.

Se calcula la capacidad en cada caso para comparar.

TODOS LOS SISTEMAS SON: (30X4), 30 antenas transmisoras y 4 receptoras.

En el caso de los sistemas DMIMO, con 3 BS cada una, cada BS tendrá 10 antenas transmisoras, de forma que en total el sistema tiene 30 antenas transmisoras.

En sistema DMIMO correlado, las antenas elegidas en cada BS son de la 1 a la antena 10.

En el sistema DMIMO no correlado las antenas elegidas son en pasos de 5 de la antena 5 a la antena 50: (5:5:50)

Para todos los sistemas las mismas antenas receptoras: 4

Se analiza para 7 valores de SINR entre 0 y 35 dB.

Se compara sistema DMIMO correlado, DMIMO no correlado, sistema MIMO a 10m y a 75m.

Cada sistema analizado se nombrará como G(i).

Se repiten los análisis a cada frecuencia.

La siguiente tabla 5.15, define los sistemas analizados:

SISTEMA G1	DMIMO	RMa	NLOS	3 BS a 10m, 50m y 75 m	Obtengo HA1.
SISTEMA G2	DMIMO	NC, RMa	NLOS	3 BS a 10m, 50m y 75 m	Obtengo HA2.
SISTEMA G3	MIMO	RMa	NLOS	Una BS a 10 m	Obtengo HA3.
SISTEMA G4	MIMO	RMa	LOS	Una BS a 75m	Obtengo HA4.
SISTEMA G5	DMIMO	UMa	NLOS	3 BS a 10m, 50m y 75 m	Obtengo HB1.
SISTEMA G6	DMIMO	NC, UMa	NLOS	3 BS a 10m, 50m y 75 m	Obtengo HB2.
SISTEMA G7	MIMO	UMa	NLOS	Una BS a 10 m	Obtengo HB3.
SISTEMA G8	MIMO	UMa	LOS	Una BS a 75m	Obtengo HB4.
SISTEMA G9	DMIMO	UMi	NLOS	3 BS a 10m, 50m y 75 m	Obtengo HC1.
SISTEMA G10	DMIMO	NC, UMi	NLOS	3 BS a 10m, 50m y 75 m	Obtengo HC2.

SISTEMA G11	MIMO	UMi	NLOS	Una BS a 10 m	Obtengo HC3.
SISTEMA G12	MIMO	UMi	LOS	Una BS a 75m	Obtengo HC4.

Tabla 5-15. Sistemas MIMO y DMIMO analizados

5.6.1 Análisis sistemas MIMO y DMIMO ANÁLISIS A 28 GHz

El sistema se nombrará como HS-SM-SDM-28G-30x

Indica un sistema obtenido a través de matriz simulada, HS. Sistema MIMO. Sistema Distribuido MIMO Masivo, DM-SDM. Análisis a 28 GHz. 30 antenas transmisoras x 4 antenas receptoras.

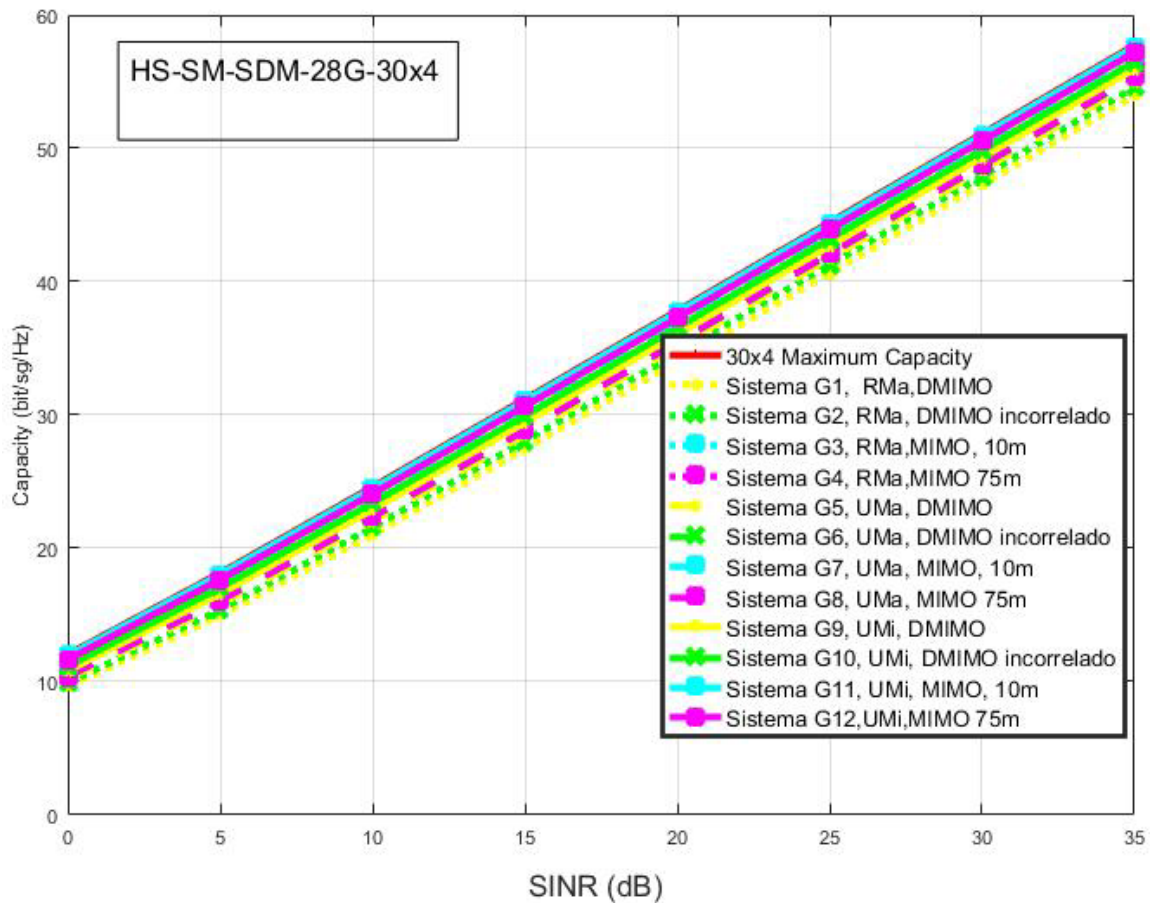


Figura 5-20. Resultados de capacidad. HS-SM-SDM-28G-30x4

Se observa en la figura 5.20, que los valores de capacidad son muy parecidos, y el parámetro más importante para obtener mejores valores de capacidad es el número de antenas.

Se representa la diferencia respecto al valor teórico para que se puedan apreciar mejor las diferencias de capacidad.



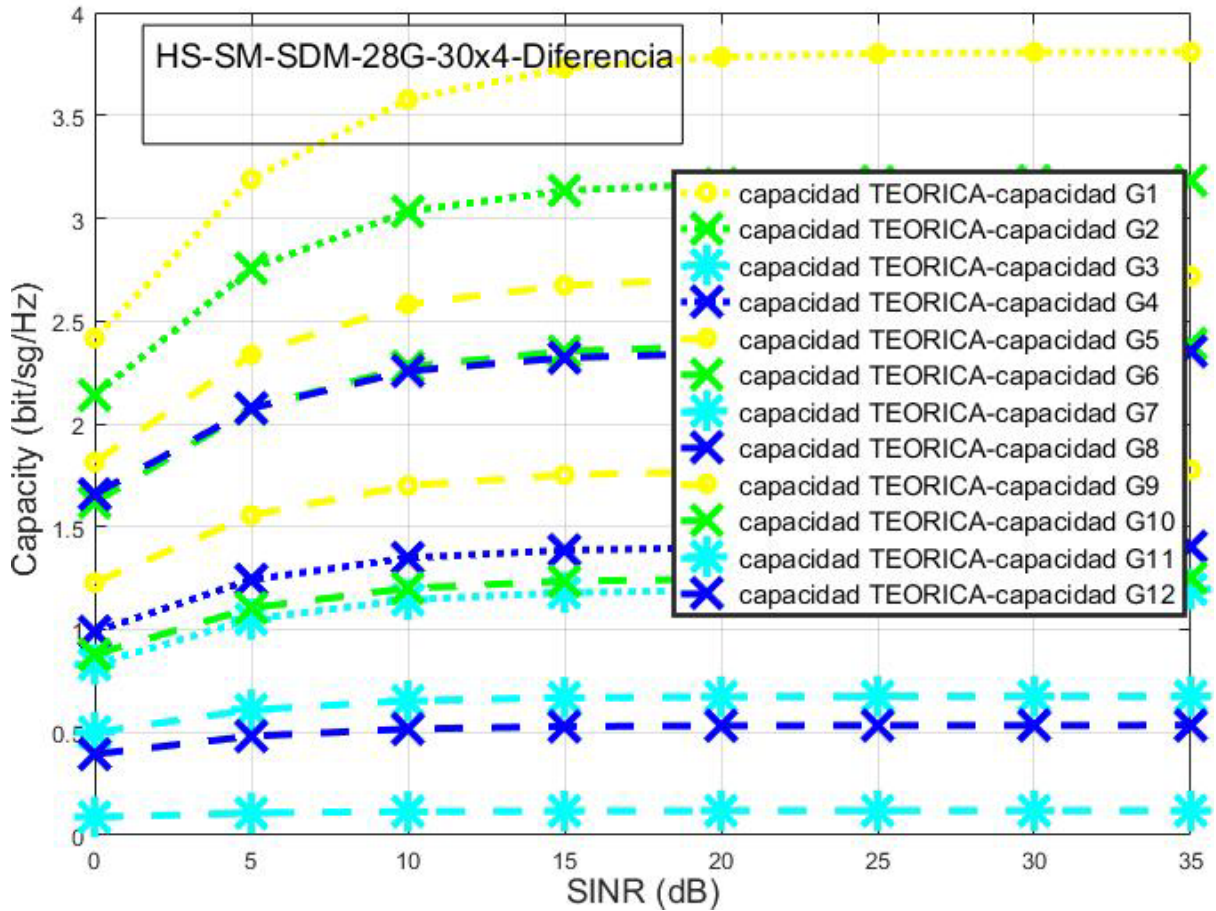


Figura 5-21. Resultados de capacidad. HS-SM-SDM-28G-30x4-Diferencia

Se observa analizando la figura 5.21, que la mayor diferencia respecto del valor máximo teórico es para los sistemas DMIMO escenario RMa. Los sistemas DMIMO en los tres escenarios tienen menor capacidad que los sistemas MIMO. El que tiene mayor capacidad son los sistemas MIMO separados 10 metros el transmisor y receptor. Dentro de los sistemas DMIMO analizados, en cada escenario, tienen mayor capacidad, o menos diferencia respecto al valor teórico máximo, los sistemas menos correlados.

Se repite el análisis a otra frecuencia

### 5.6.2 Análisis sistemas MIMO y DMIMO ANÁLISIS A 40 GHz

El sistema se nombrará como HS-SM-SDM-40G-30x4

Indica un sistema obtenido a través de matriz simulada, HS. Sistema MIMO. Sistema Distribuido MIMO Masivo, DM-SDM. Análisis a 40 GHz. 30 antenas transmisoras x 4 antenas receptoras.

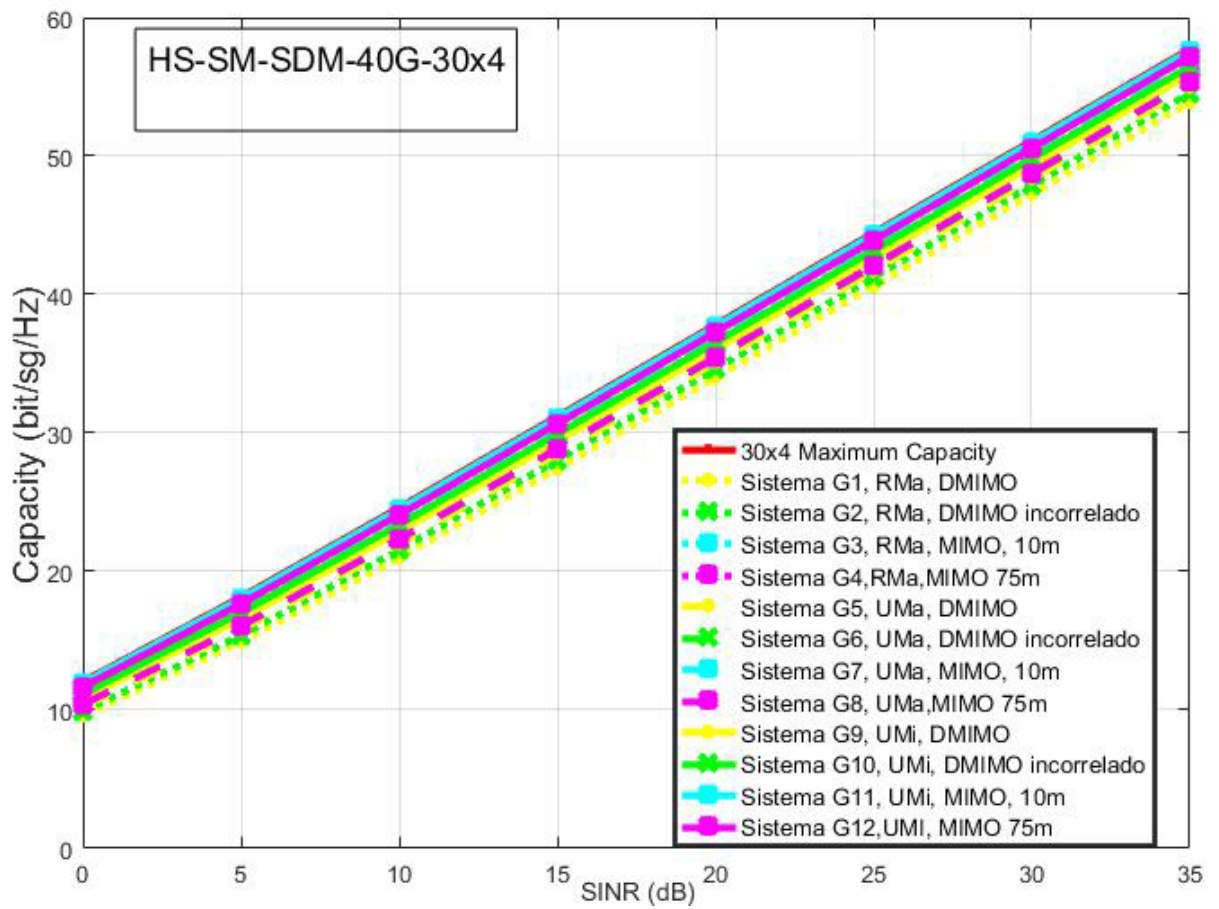


Figura 5-22. Resultados de capacidad. HS-SM-SDM-40G-30x4

Los valores de capacidad en esta frecuencia son los mismos que en la frecuencia de 28 GHz. No hay variación con la frecuencia.

Se representa la diferencia respecto al valor teórico para que se puedan apreciar mejor las diferencias de capacidad.



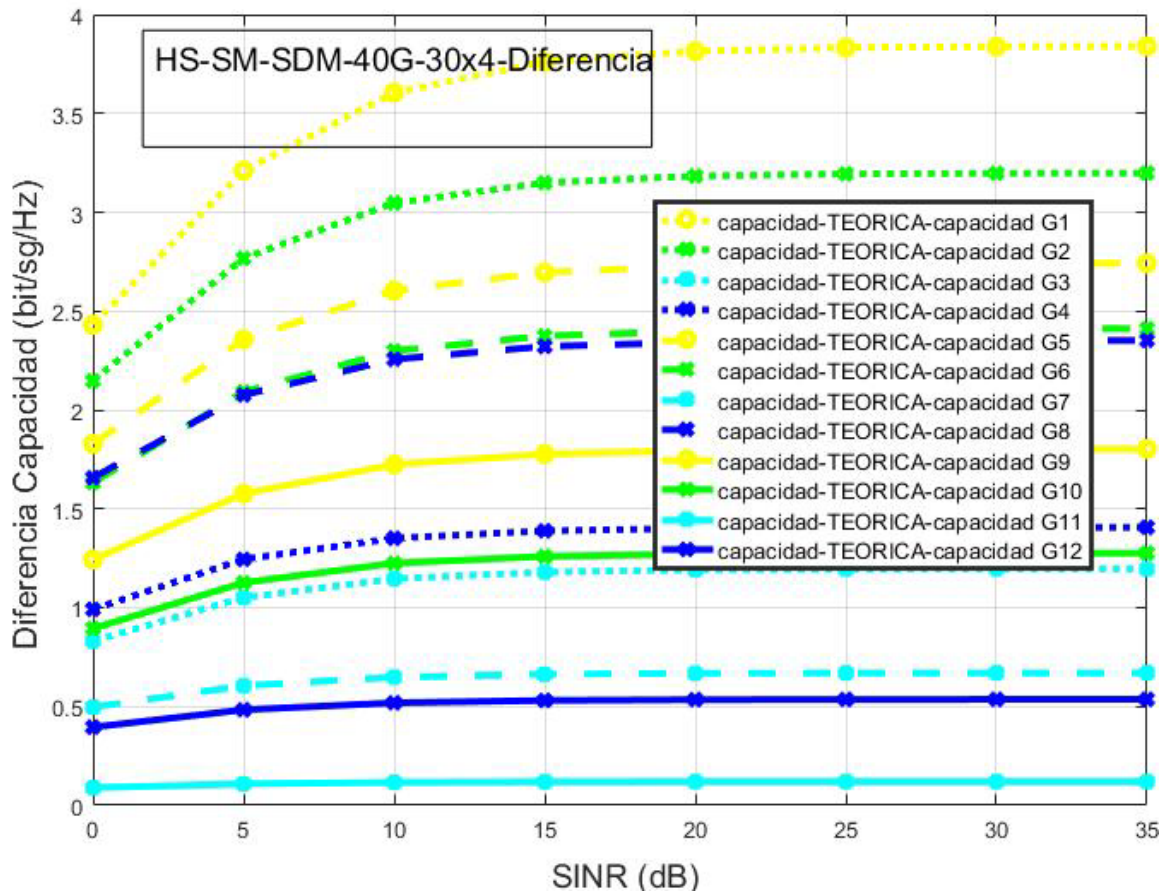


Figura 5-23. Resultados de capacidad. HS-SM-SDM-40G-30x4-Diferencia

Se obtienen los mismos resultados que a la frecuencia de 28 GHz, lo que indica que la capacidad de estos sistemas MIMO y DMIMO no varían con la frecuencia.

### 5.6.3 Análisis sistemas MIMO y DMIMO ANÁLISIS A 78 GHz

El sistema se nombrará como HS-SM-SDM-78G-30x4.

Indica un sistema obtenido a través de matriz simulada, HS. Sistema MIMO. Sistema Distribuido MIMO Masivo, DM-SDM. Análisis a 40 GHz. 30 antenas transmisoras x 4 antenas receptoras.

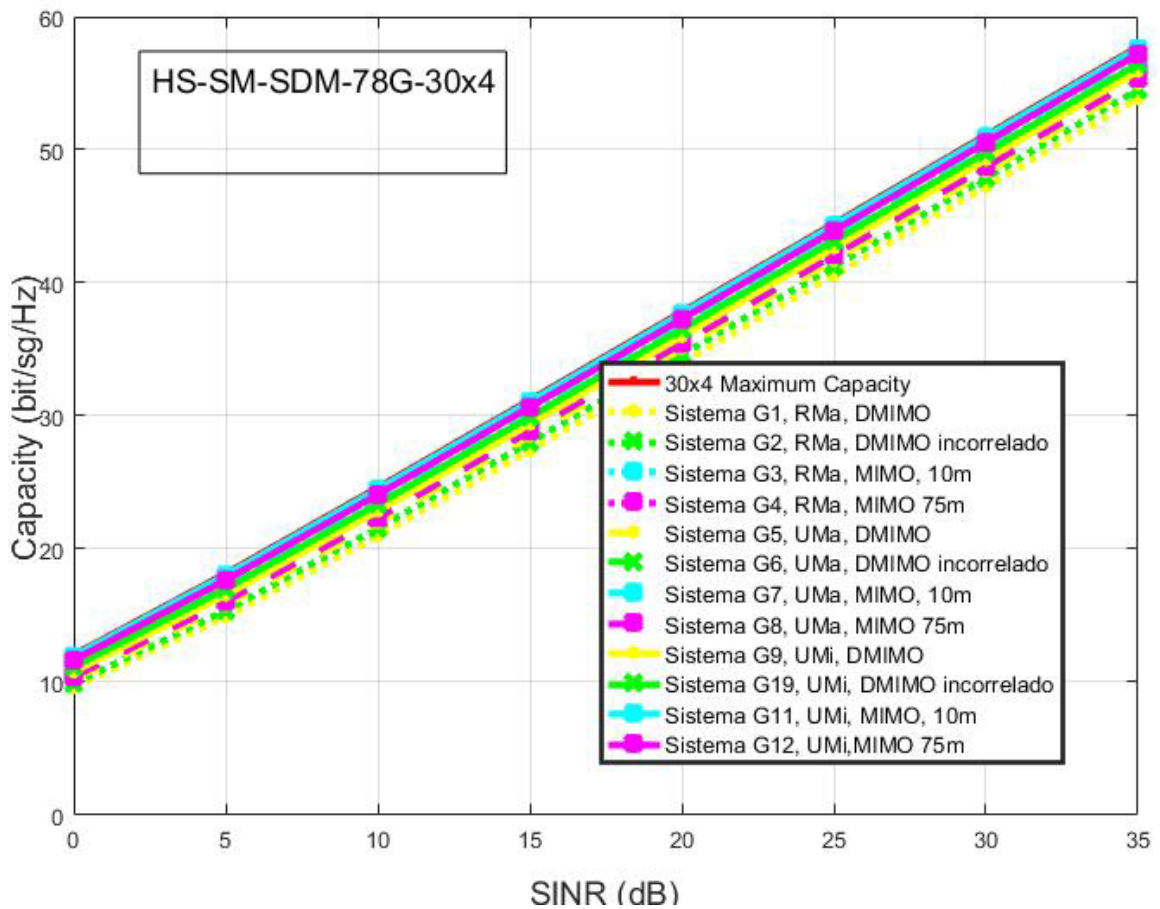


Figura 5-24. Resultados de capacidad. HS-SM-SDM-78G-30x4

Prácticamente no hay diferencia entre usar un sistema u otro, ni siquiera la frecuencia alta como 78 GHz. Lo que importa es que se usan 30 antenas de transmisión en todos los casos, y eso determina la capacidad.

No incluyo la gráfica de las diferencias respecto al valor teórico máximo, ya que es la misma que a las otras frecuencias y no aporta información.

### 5.7 Sistema DM-MIMO 60X4.

El sistema se nombrará como HS-DM-SDM-3BS-60x4

Indica un sistema obtenido a través de matriz simulada, HS. Sistema Distribuido MIMO Masivo, DM-SDM. Sistema con 3BS. 60 antenas transmisoras x 4 antenas receptoras.

Repito el análisis, calculando la capacidad para cada escenario y frecuencia, pero se aumenta el número de antenas en cada BS.

Ahora se trabaja con un sistema DMIMO 60x4 antenas.

Sistema DMIMO formado por 3 BS con 20 antenas cada una.

SISTEMA. (60X4)

ANTENAS TRANSMISORAS	1:20	1:20	1:20
	BS1	BS2	BS3
	Distancia 10 m	Distancia 50 m	Distancia 75 m

**Tabla 5-16. Antenas elegidas. HS-SDM-3BS-60x4**

Se repite el análisis sobre los mismos escenarios. En cada uno de los análisis se comparan 3 casos diferentes formados por diferentes las capacidades obtenidas en diferentes escenarios.

Cada sistema analizado se nombrará como H(i).

Tabla 5.17 de los sistemas analizados.

SISTEMA	ESCENARIO	VISIBILIDAD
SISTEMA H1	RMa	NLOS
SISTEMA H2	UMa	NLOS
SISTEMA H3	UMi	LOS

**Tabla 5-17. Escenarios analizados. HS-SDM-3BS-30x4**

Se repite el análisis para cada una de las tres frecuencias mencionadas anteriormente.

### 5.7.1 Análisis a 28 GHz

El sistema se nombrará como HS-SM-SDM-3BS-28G-60x4

Indica un sistema obtenido a través de matriz simulada, HS. Sistema MIMO. Sistema Distribuido MIMO Masivo, DM-SDM. Sistema con 3BS. Análisis a 28 GHz. 60 antenas transmisoras x 4 antenas receptoras.

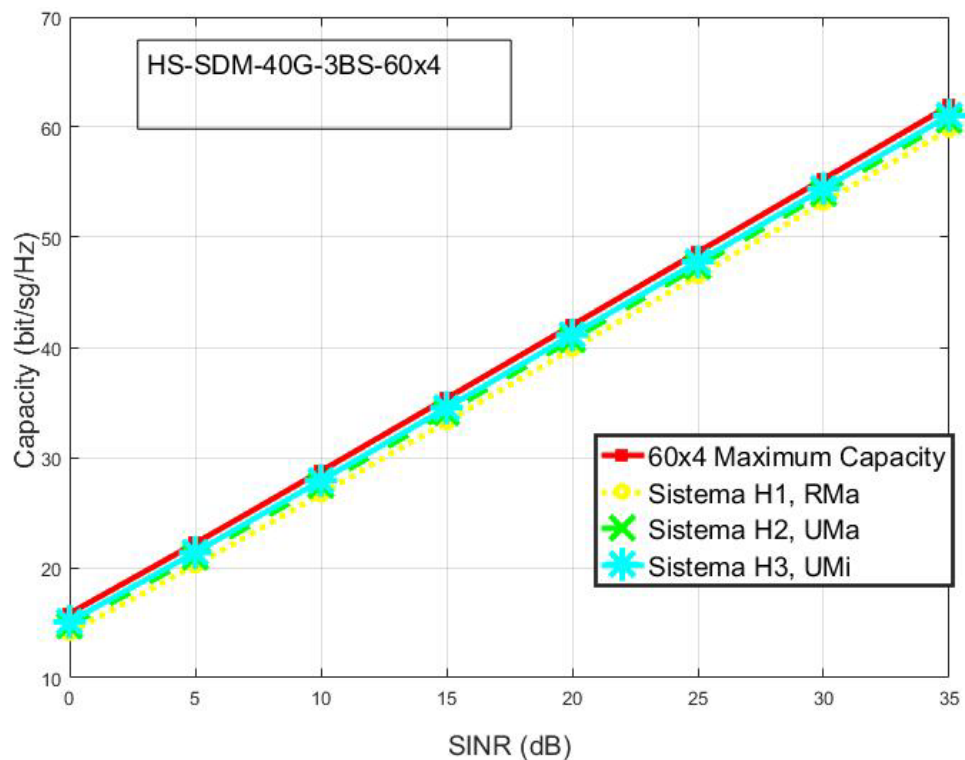


Figura 5-25. Resultados de capacidad. HS-SDM-3BS-28G-60x4

Se observa en la figura 5.25, que la capacidad total de cada caso aumenta, al aumentar el número de antenas transmisoras. No obstante, la diferencia entre cada caso no se aprecia bien, y represento la diferencia de la capacidad con respecto a cada caso.

También se aprecia que la capacidad de los 3 casos se acerca más al valor teórico máximo.

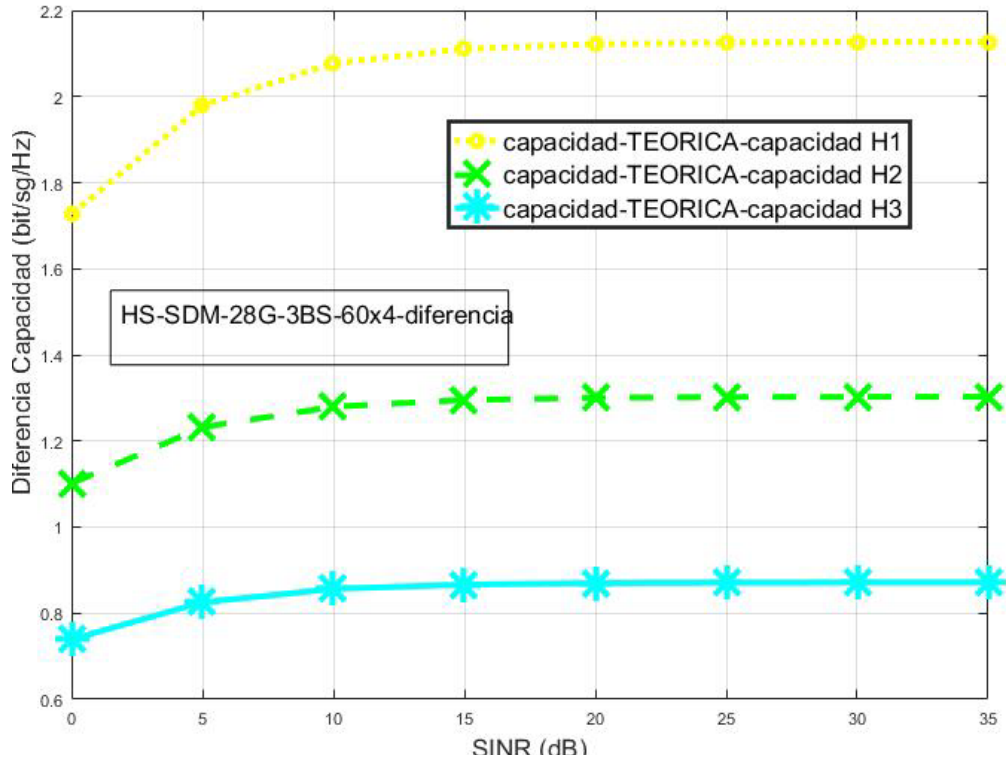


Figura 5-26. Resultados de capacidad. HS-SDM-28G-3BS-60x4-diferencia

Se observa en la figura 5.26, que al aumentar (duplicar) el número de antenas, la capacidad del sistema mejora. Los tres sistemas 1, 2 y 3 se acercan más al valor teórico, y la diferencia con respecto al valor máximo se reduce a la mitad.

Las diferencias de cada sistema con respecto al valor teórico, máximo, son la mitad que las del caso anterior, A1.

### 5.7.2 Análisis a 40 GHz

El sistema se nombrará como HS-SM-SDM-3BS-40G-60x4

Indica un sistema obtenido a través de matriz simulada, HS. Sistema MIMO. Sistema Distribuido MIMO Masivo, DM-SDM. Sistema con 3BS. Análisis a 40 GHz. 60 antenas transmisoras x 4 antenas receptoras.

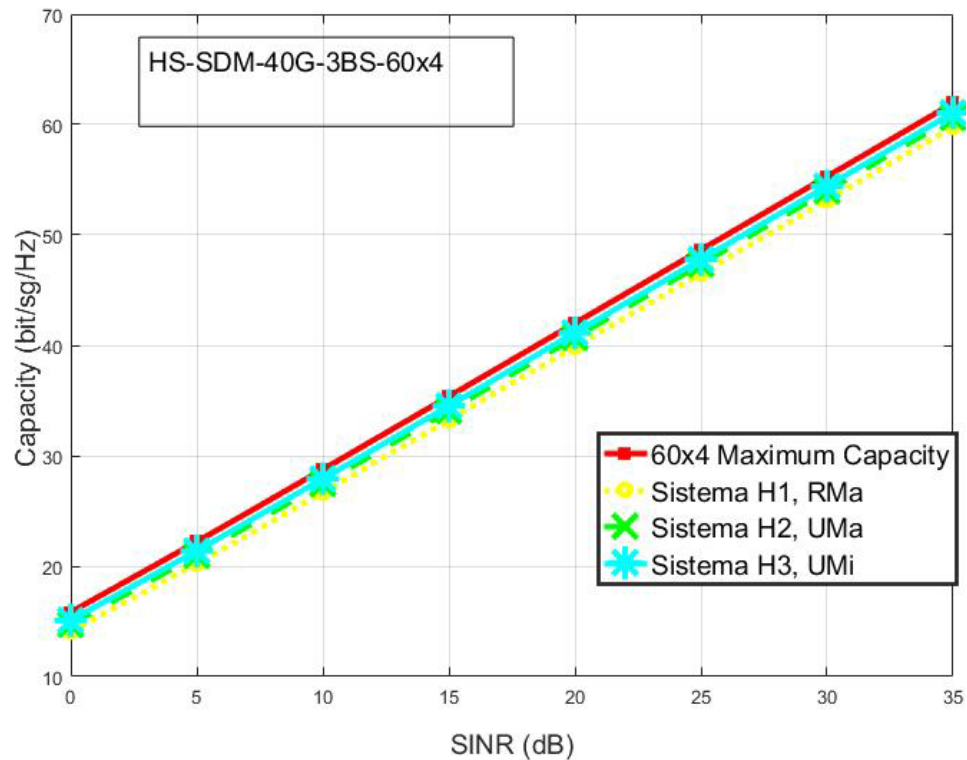


Figura 5-27. Resultados de capacidad. HS-SDM-3BS-40G-60x4

Se repiten los resultados del análisis a 28 GHz, no se obtiene variación en la capacidad al aumentar de 28 GHz a 40 GHz.

### 5.7.3 Análisis a 78 GHz

El sistema se nombrará como HS-SM-SDM-3BS-78G-60x4

Indica un sistema obtenido a través de matriz simulada, HS. Sistema MIMO. Sistema Distribuido MIMO Masivo, DM-SDM. Sistema con 3BS. Análisis a 78 GHz. 60 antenas transmisoras x 4 antenas receptoras.

Se repite los análisis aumentando la frecuencia a 78 GHz.

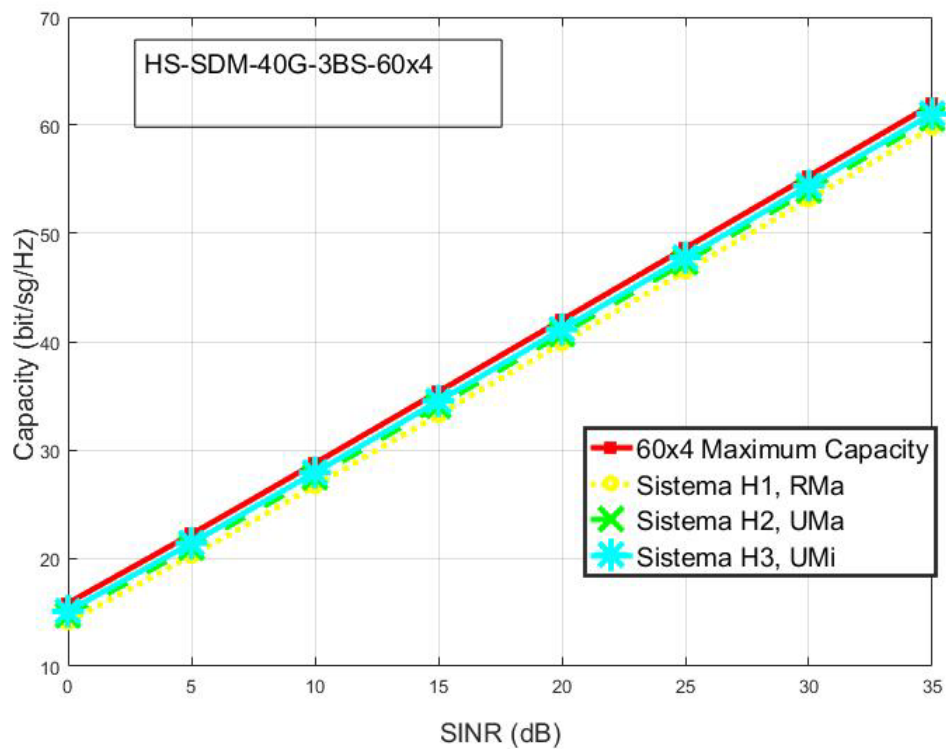


Figura 5-28. Resultados de capacidad. HS-SDM-3BS-78G-60x4

Resultado parecido a usar 10 antenas en cada BS, pero aumentando la capacidad. Lógicamente cuantas más antenas usemos más se aproxima al valor teórico. No influye mucho el aumentar en frecuencia. El usar 20 antenas en cada BS aumenta la capacidad en todas las frecuencias, pero el comportamiento es el mismo que en 10 antenas por Bs para cada escenario.

### 5.8 Sistema M-MIMO 30x10

Se estudian diferentes sistemas MIMO en los 3 escenarios, RMa, UMa y UMi, en visión LOS y NLOS, para 10 GHz, 28 GHz Y 40 GHz, en las distancias de 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 y 100 metros.

Se analizan sistemas correlados, es decir se eligen las antenas colocadas una a continuación de la otra.

Se aumenta el número de antenas receptoras y se analizan diferentes sistemas MIMO situados a diferentes distancias el transmisor del receptor, para estudiar cómo influye en el sistema.

Las condiciones del análisis son las descritas en la tabla 5.18:

ANTENAS TRANSMISORAS.	30, elegidas las 30 antenas primeras
ANTENAS RECEPTORAS	10
Número de localizaciones.	10
Distancias entre las antenas tx,	0,1

Distancias entre las antenas receptoras	0,1.
Ancho del lóbulo	10°
Visión	LOS y NLOS
Frecuencias	10 GHz, 28 GHz Y 40 GHz,
Distancias entre transmisor y receptor:	5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 y 100 metros
Solo tomo 1 valor de SINR .	0 dB
Tomo los valores de distancia entre transmisor y receptor	a 5, 10, 20, 30, 40, 50 ,60, 70, 80,100 metros.

**Tabla 5-18. Análisis sistema MIMO. HS-SM-30x10**

Se obtiene la Capacidad Media cada distancia

Se obtiene una matriz H de cada sistema MIMO por cada una de las 10 localizaciones. Es decir, se tiene 10 matrices H de transmisión para cada sistema.

Se presenta en las figuras la capacidad media (CM) para los 10 valores de capacidad obtenida cada una para cada localización.

Se prestan en las figuras los valores de CM para diferentes frecuencias, con visión LOS y NLOS, en los 3 escenarios.

Cada punto en la figura representa la capacidad media para las 10 localizaciones calculadas, de cada sistema MIMO situado a una distancia del transmisor y receptor entre 5 y 100 metros.

Cada sistema analizado se nombrará como I(i)

Tabla 5.19 con los sistemas a analizados:

SISTEMA	ESCENARIO	VISIBILIDAD	FRECUENCIA
SISTEMA I1	RMa	LOS	10 GHz
SISTEMA I2	RMa	NLOS	10 GHz
SISTEMA I3	RMa	LOS	28 GHz
SISTEMA I4	RMa	NLOS	28 GHz
SISTEMA I5	UMa	LOS	10 GHz
SISTEMA I6	UMa	NLOS	10 GHz
SISTEMA I7	UMa	LOS	28 GHz
SISTEMA I8	UMa	NLOS	28 GHz
SISTEMA I9	UMa	LOS	40 GHz
SISTEMA I10	UMi	LOS	10 GHz
SISTEMA I11	UMi	NLOS	10 GHz
SISTEMA I12	UMi	LOS	28 GHz
SISTEMA I13	UMi	NLOS	28 GHz
SISTEMA I14	UMi	LOS	40 GHz
SISTEMA I15	UMi	NLOS	40 GHz

**Tabla 5-19. Escenarios analizados. HS-SM-30x10**



5.8.1 Análisis escenario RMa.

El sistema se nombrará como HS-SM-RMa-30x10

Indica un sistema obtenido a través de matriz simulada, HS. Sistema MIMO. Escenario RMa. 30 antenas transmisoras x 10 antenas receptoras.

Se analiza en diferentes frecuencias en el entorno RMa, con visibilidad directa y no directa.

Las figuras están referenciadas con respecto a la distancia a la que se encuentra la BS del receptor.

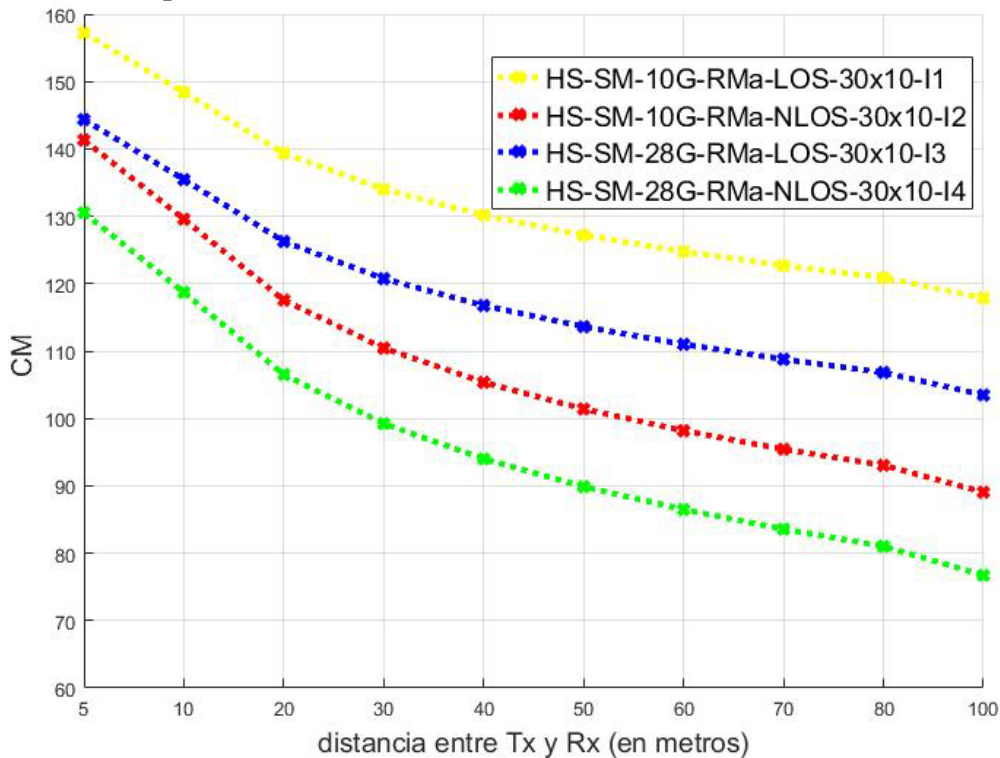


Figura 5-29. Comparativa CM escenario RMa. HS-SM-30x10

En la figura 5.29, se observa, que las capacidades medias decrecen al alejar el transmisor y el receptor, de una forma casi lineal con la distancia. Los sistemas que tienen mayor capacidad, para cualquier distancia, son los de visibilidad directa para las dos frecuencias.

Además, la capacidad media decrece al aumentar la frecuencia, con respecto al análisis igual de menor frecuencia.

5.8.2 Análisis escenario UMa.

El sistema se nombrará como HS-SM-UMa-30x10

Indica un sistema obtenido a través de matriz simulada, HS. Sistema MIMO. Escenario UMa. 30 antenas transmisoras x 10 antenas receptoras.



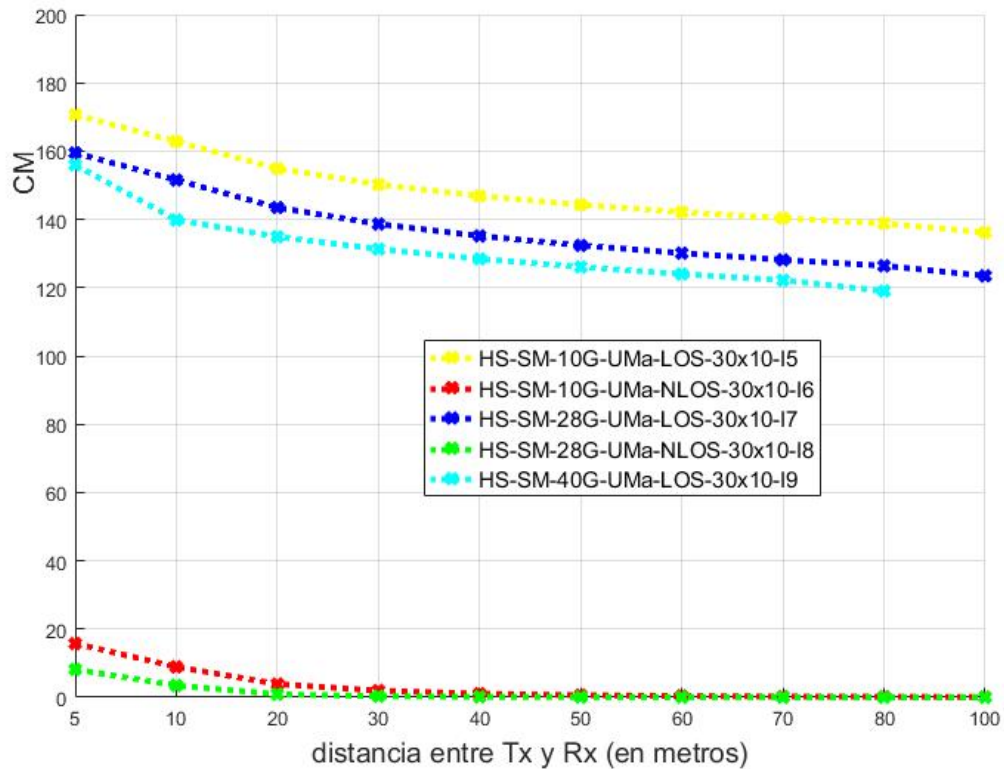


Figura 5-30. Resultados de CM. HS-SM-10G-UMa-LOS-30x10

En la figura 5.30 se observa que en el escenario de trabajo, UMa, LOS, la capacidad es parecida a los valores de RMa, pero con la capacidad más alta. Aunque la capacidad disminuye al aumentar la frecuencia.

En cambio, para visión NLOS en este escenario, UMa, la capacidad disminuye rápidamente con la distancia, y para valores de separación de apenas 10 metros entre transmisor y receptor, la capacidad es prácticamente nula.

### 5.8.3 Análisis escenario UMi.

El sistema se nombrará como HS-SM-RMi-30x10

Indica un sistema obtenido a través de matriz simulada, HS. Sistema MIMO. Escenario RMi.360 antenas transmisoras x 10 antenas receptoras.

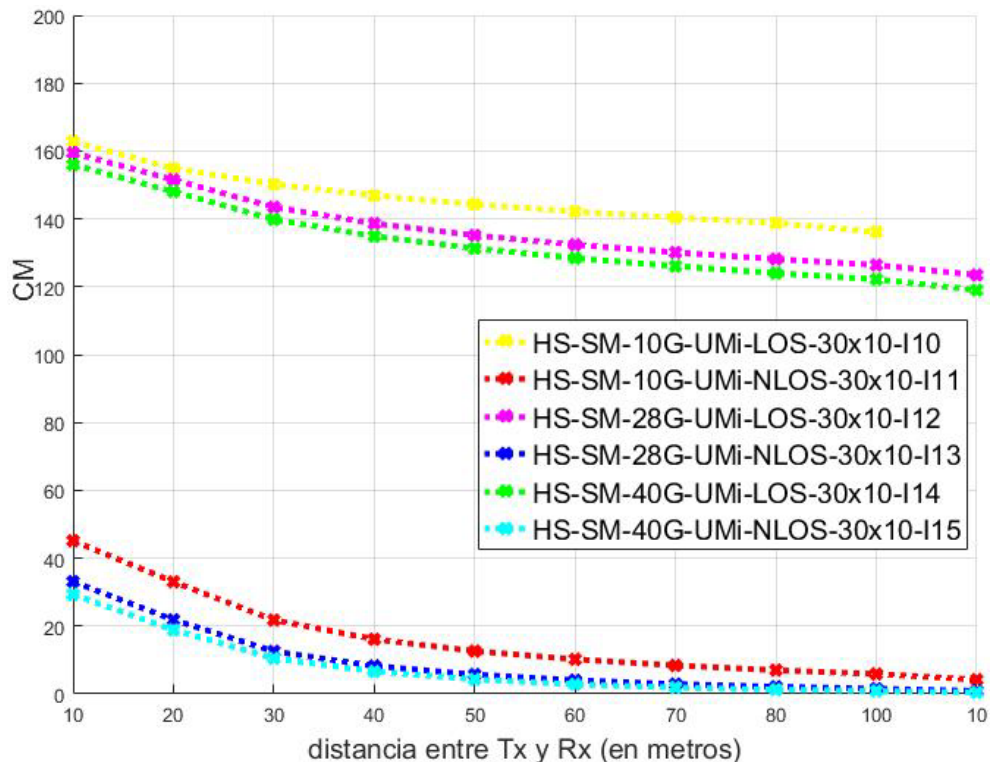


Figura 5-31. Resultados de CM. HS-SM-10G-UMi-LOS-30x10

Analizando la figura 5.31, se observa que este escenario tiene una capacidad media parecida al entorno UMA en visión LOS. En visión NLOS la capacidad es un poco más alta, pero también es muy baja y decrece rápidamente con la distancia.

La propagación NLOS no es permitida en estas frecuencias al igual que en UMA. Disminuye mucho la capacidad

En conclusión, se aprecia que la comunicación en entorno NLOS solo se permite en RMA, aunque disminuye mucho la capacidad con respecto a LOS. Al aumentar las frecuencias disminuye la capacidad, pero no excesivamente.

Aunque estos valores de capacidad están obtenidos para una SINR de 0 dB, son valores mucho más altos que los obtenidos en los valores de capacidad del análisis de sistemas MIMO 30x4, realizados en este capítulo en el punto 5.3. Esto es lógico, ya que, aunque se mantiene el número de antenas transmisoras en 30, el número de antenas receptoras se aumenta de 4 a 10 antenas, y ello hace que aumente mucho la capacidad.

### 5.9 Sistema DM-MIMO con 5 BS. 50x10.

Se estudiará en este capítulo los sistemas DMIMO en diferentes escenarios, en, RMA, UMA, y UMi, en visión LOS y NLOS, para 10GHz, 28GHz y 40 GHz, en las distancias de 20, 40, 60, 80 y 100 metros.

Cada sistema DMIMO estará formado por 5 BS situadas a diferentes distancias, 20, 40, 60, 80 y 100 metros del receptor. De forma que se dispone de 5BS situadas a diferentes distancias.

Se realizan 2 pruebas:

- Caso a) una con los sistemas muy correlados, tomando las antenas situadas una a continuación de la otra. Distancias entre las antenas tx, 0,1;; Distancias entre las antenas receptoras 0,1. Ancho del lóbulo: 10°.
- Caso b), otra con los sistemas incorrelada, variando las distancias entre las antenas transmisoras. distancias entre las antenas tx, 5;; Distancias entre las antenas receptoras 1. Ángulo de elevación  $\theta = 90^\circ$ .

Se analiza el valor medio de la capacidad para cada SINR.

PARA TODOS LOS SISTEMAS LAS MISMAS ANTENAS RECEPTORAS

Antenas receptoras 10.

ANTENAS TRANSMISORAS 10 en cada BS, tomo 5 BS, en total 50 antenas transmisoras.

Sistema 50x10

Número de localizaciones 10.

Solo se toma valores de SINR -15:5:15 dB.

Solo se evalúa a una frecuencia

En este caso, se representa la Capacidad Media (C.M.), respecto a  $SINR(dB) = -15:5:15$ ; para cada escenario y frecuencia.

### 5.9.1 Sistema DM-MIMO con 5 BS. 50x10. Correlado

El sistema se nombrará como HS- DM-MIMO -5BS-50x10-a

Indica un sistema obtenido a través de matriz simulada, HS. Sistema Distribuido MIMO Masivo, DM-SDM. Sistema con 5BS. 50 antenas transmisoras x 10 antenas receptoras. Caso a.

#### Caso a.

Distancias entre las antenas tx, 1;; Distancias entre las antenas receptoras 1. Ángulo de elevación  $\theta = 10^\circ$ .

Cada sistema analizado se nombrará como J(i)

Tabla 5.20, con los sistemas a analizados:

SISTEMA	ESCENARIO	VISIBILIDAD	FRECUENCIA	CASO
SISTEMA J1	RMa	LOS	10 GHz	a
SISTEMA J2	RMa	NLOS	10 GHz	a
SISTEMA J3	UMa	LOS	10 GHz	a
SISTEMA J4	UMa	NLOS	10 GHz	a
SISTEMA J5	UMi	LOS	10 GHz	a
SISTEMA J6	UMi	NLOS	10 GHz	a

SISTEMA J7	RMa	LOS	28 GHz	a
SISTEMA J8	RMa	NLOS	28 GHz	a
SISTEMA I9	UMa	LOS	28 GHz	a
SISTEMA I10	UMa	NLOS	28 GHz	a
SISTEMA I11	UMi	LOS	28 GHz	a
SISTEMA I12	UMi	NLOS	28 GHz	a
SISTEMA I13	RMa	LOS	40 GHz	a
SISTEMA I14	UMa	LOS	40 GHz	a
SISTEMA I15	UMi	NLOS	40 GHz	a

Tabla 5-20. Escenarios analizados. HS-SM-30x10-a

5.9.1.1 Sistema DM-MIMO. Análisis a 10GHz.

El sistema se nombrará como HS-DM-SDM-5BS-10G--50x10-a.

Indica un sistema obtenido a través de matriz simulada, HS. Sistema Distribuido MIMO Masivo, DM-SDM. Sistema con 5BS. Análisis a 10 GHz. 50 antenas transmisoras x 10 antenas receptoras. Caso a.

Se compara gráficamente la capacidad en los 3 escenarios para la frecuencia de 10 GHz.

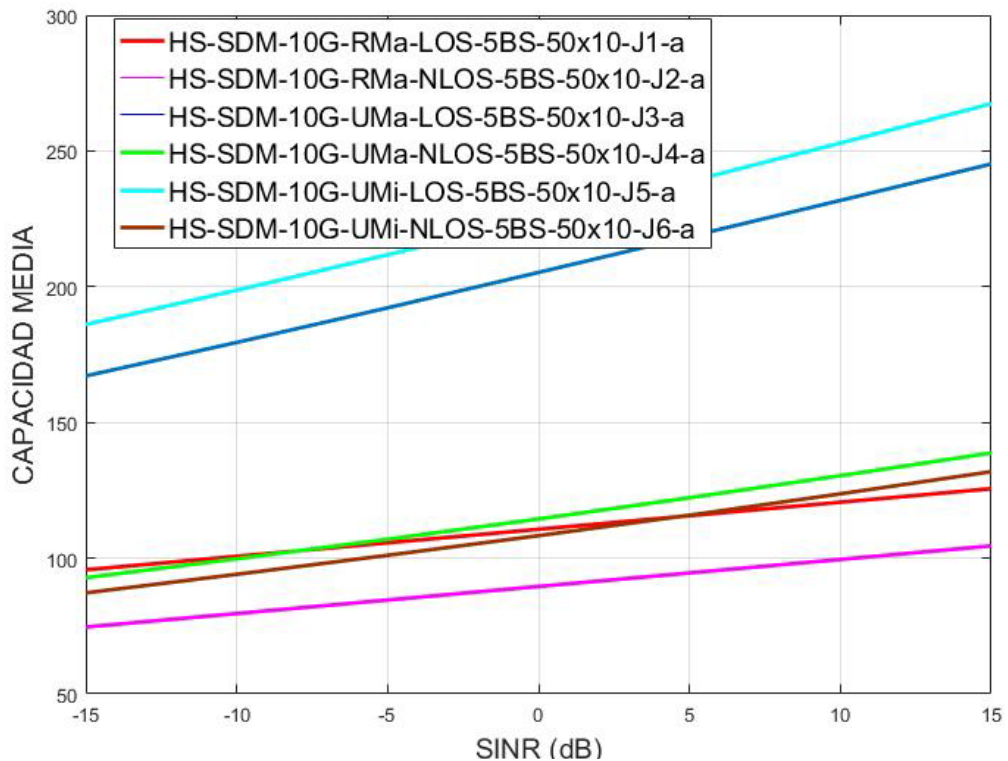


Figura 5-32. Comparativa a 10GHz. HS-SDM-5BS -10G-50x10-a

En la figura 5.32 se observa que las capacidades medias aumentan linealmente con el valor de SINR. La capacidad del sistema para los escenarios UMa y UMi, en visión LOS son los valores máximos y coinciden. En visión NLOS, los valores de capacidades de los escenarios UMa y UMi, son bajos, comparables a los valores del escenario RMa en visión LOS y NLOS.

5.9.1.2 Sistema DM-MIMO. Análisis a 28 GHz

El sistema se nombrará como HS-DM-SDM-5BS-28G-50x10-a.

Indica un sistema obtenido a través de matriz simulada, HS. Sistema Distribuido MIMO Masivo, DM-SDM. Sistema con 5BS. Análisis a 28 GHz. 50 antenas transmisoras x 10 antenas receptoras. Caso a.

Se repite el análisis a la frecuencia de 28 GHz

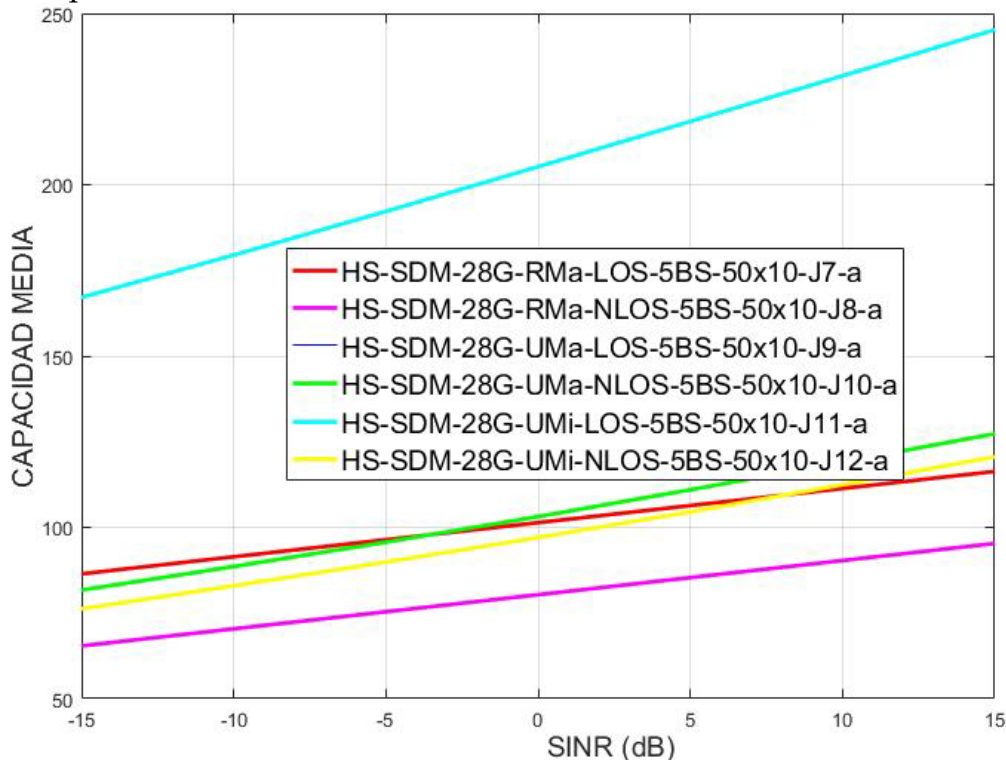


Figura 5-33 . Comparativa a 28GHZ. HS-SDM-5BS -28G-50x10-a

En la frecuencia de 28 GHz, la capacidad es un poco menor que en 10 GHz, en todos los casos. La capacidad del sistema para los escenarios UMA y UMi, en visión LOS son los valores máximos y coinciden.

5.9.1.3 Sistema DM-MIMO. Análisis a 40 GHz

El sistema se nombrará como HS-DM-SDM-5BS-40G-50x10-a.

Indica un sistema obtenido a través de matriz simulada, HS. Sistema Distribuido MIMO Masivo, DM-SDM. Sistema con 5BS. Análisis a 40 GHz. 50 antenas transmisoras x 10 antenas receptoras. Caso a.

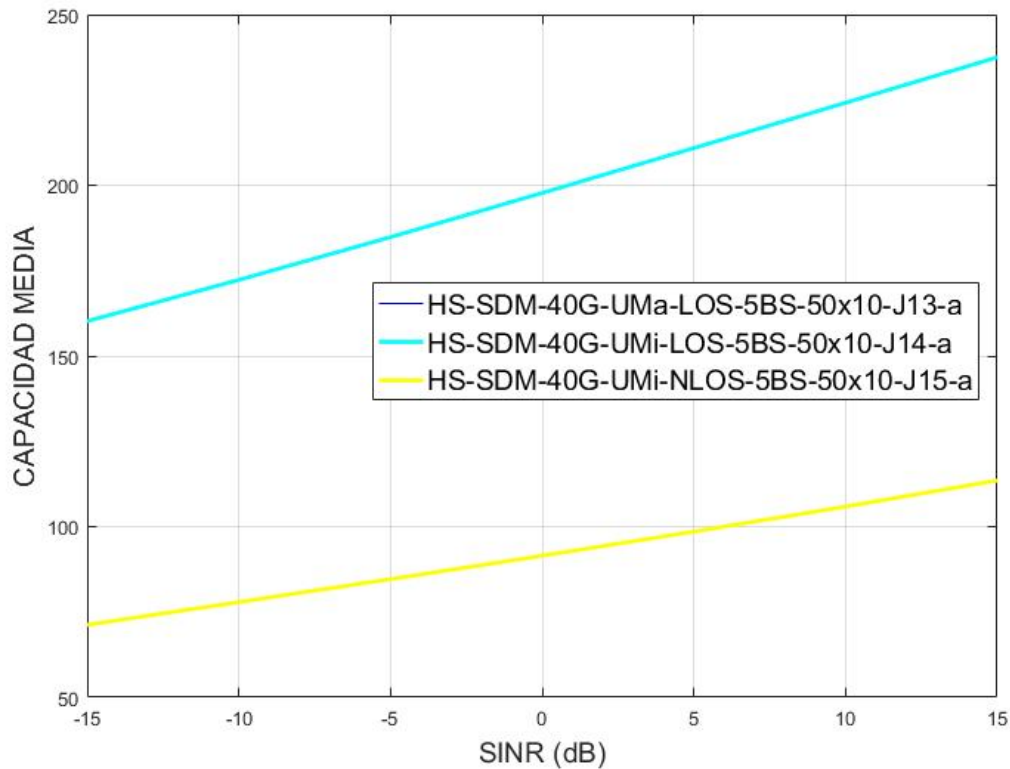


figura 5-34. Comparativa a 40 GHZ. HS-SDM-5BS -40G-50x10-a

En frecuencia de 40 GHz se mantiene la tendencia, que UMA y UMi son iguales en visibilidad LOS, y la capacidad media decrece algo con la frecuencia, pero se mantiene la tendencia en el sentido que todos los valores bajan la capacidad igual con la frecuencia. El sistema UMi NLOS disminuye al igual que en las otras frecuencias.

#### 5.9.2 Sistema DM-MIMO con 5 BS. 50x10. NO correlado

El sistema se nombrará como HS- DM-MIMO -5BS-50x10-b

Indica un sistema obtenido a través de matriz simulada, HS. Sistema Distribuido MIMO Masivo, DM-SDM. Sistema con 5BS. 50 antenas transmisoras x 10 antenas receptoras. Caso b.

#### Caso b.

Distancias entre las antenas tx, 5; Distancias entre las antenas receptoras 1. Ángulo de elevación  $\theta = 90^\circ$ .

Cada sistema analizado se nombrará como J(i)

Tabla 5.21, con los sistemas a analizados:

SISTEMA	ESCENARIO	VISIBILIDAD	FRECUENCIA	CASO
SISTEMA J1	RMa	LOS	10 GHz	b
SISTEMA J2	RMa	NLOS	10 GHz	b
SISTEMA J3	UMa	LOS	10 GHz	b
SISTEMA J4	UMa	NLOS	10 GHz	b
SISTEMA J5	UMi	LOS	10 GHz	b
SISTEMA J6	UMi	NLOS	10 GHz	b
SISTEMA J7	RMa	LOS	28 GHz	b
SISTEMA J8	RMa	NLOS	28 GHz	b
SISTEMA I9	UMa	LOS	28 GHz	b
SISTEMA I10	UMa	NLOS	28 GHz	b
SISTEMA I11	UMi	LOS	28 GHz	b
SISTEMA I12	UMi	NLOS	28 GHz	b
SISTEMA I13	RMa	LOS	40 GHz	b
SISTEMA I14	UMa	LOS	40 GHz	b
SISTEMA I15	UMi	NLOS	40 GHz	b

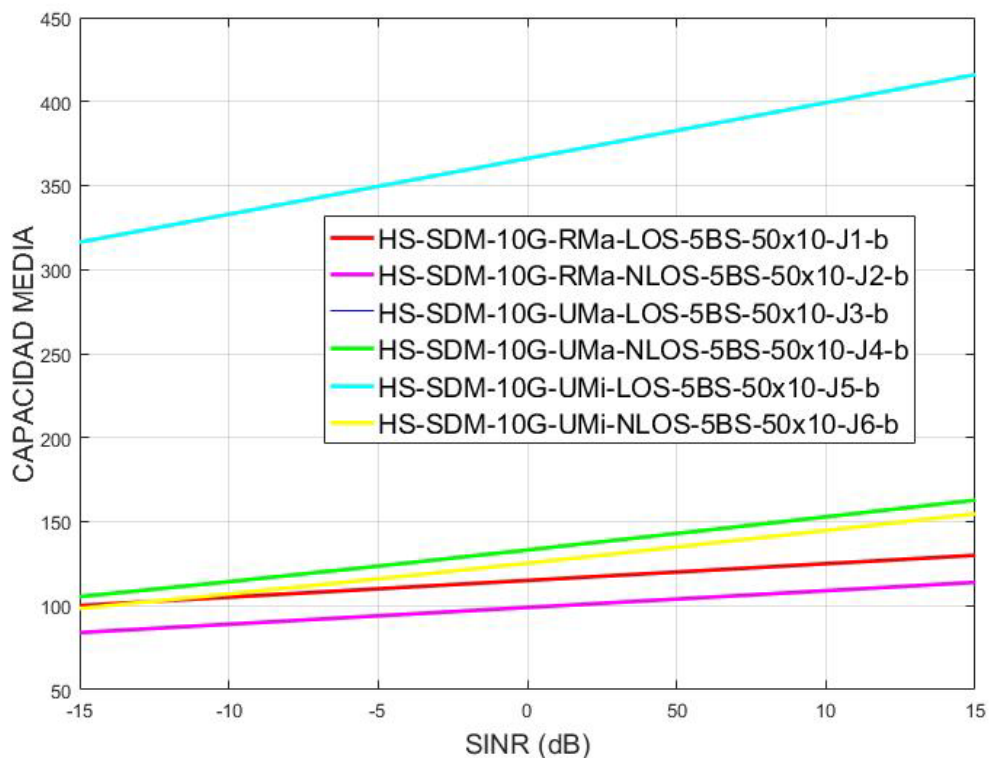
Tabla 5-21. Escenarios analizados. HS-SM-30x10-b

5.9.2.1 Sistema DM-MIMO. Análisis a 10 GHz

El sistema se nombrará como HS-DM-SDM-5BS-10G-50x10-b.

Indica un sistema obtenido a través de matriz simulada, HS. Sistema Distribuido MIMO Masivo, DM-SDM. Sistema con 5BS. Análisis a 10 GHz. 50 antenas transmisoras x 10 antenas receptoras. Caso b.

Sistema no correlado.





**Figura 5-35. Comparativa a 10 GHZ. Sistema No correlado. HS-SDM-5BS-10G-50x10-b**

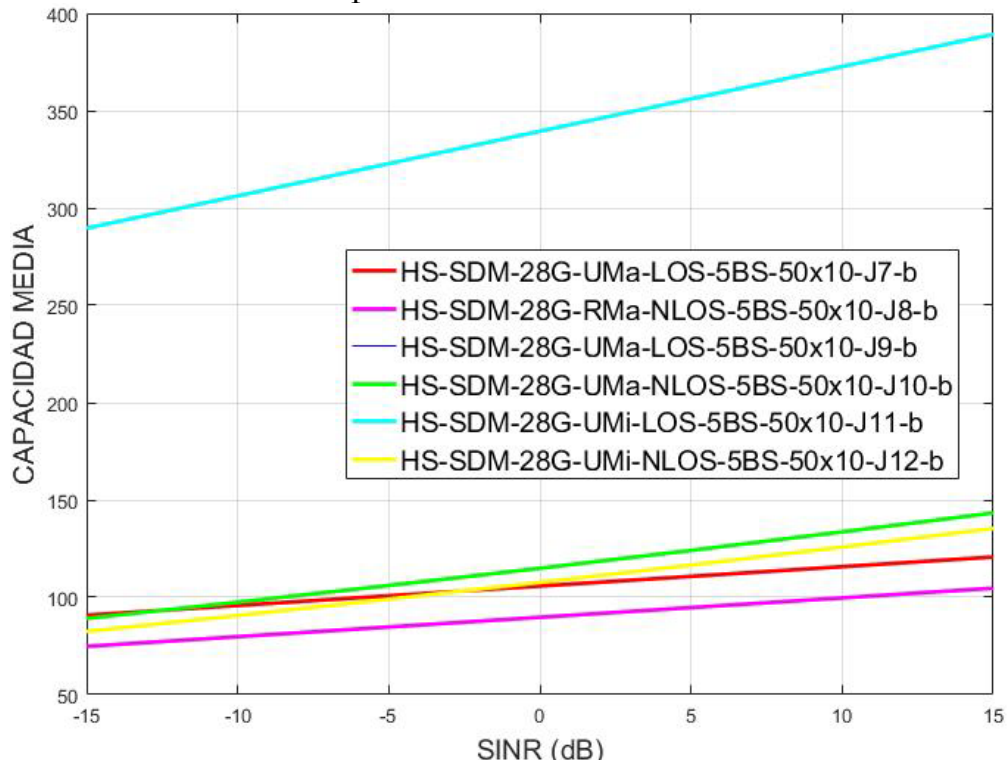
Las capacidades medias para los escenarios UMa y UMi, que coinciden, son mucho mayores que en el caso igual a 10 GHz correlados. Es decir, se produce un aumento importante de la capacidad al ser sistemas no correlados.

En cambio, en el resto de casos, RMa LOS y N LOS, y UMA y UMi NLOS, las capacidades medias son de valores parecidos al caso anterior correlado, para la misma frecuencia.

5.9.2.2 Sistema DM-MIMO. Análisis a 28 GHz

El sistema se nombrará como HS-DM-SDM-5BS-28G-50x10-b.

Indica un sistema obtenido a través de matriz simulada, HS. Sistema Distribuido MIMO Masivo, DM-SDM. Sistema con 5BS. Análisis a 28 GHz. 50 antenas transmisoras x 10 antenas receptoras. Caso b.



**Figura 5-36. Comparativa a 28 GHZ. Sistema No correlado. HS-SDM-5BS-28G-50x10-b.**

Todos los valores de capacidad disminuyen en la misma proporción que el del caso anterior de frecuencia 10 GHz.

5.9.2.3 Sistema DM-MIMO. Análisis a 40 GHz

El sistema se nombrará como HS-DM-SDM-5BS-40G-50x10-b.



Indica un sistema obtenido a través de matriz simulada, HS. Sistema Distribuido MIMO Masivo, DM-SDM. Sistema con 5BS. Análisis a 40 GHz. 50 antenas transmisoras x 10 antenas receptoras. Caso b.

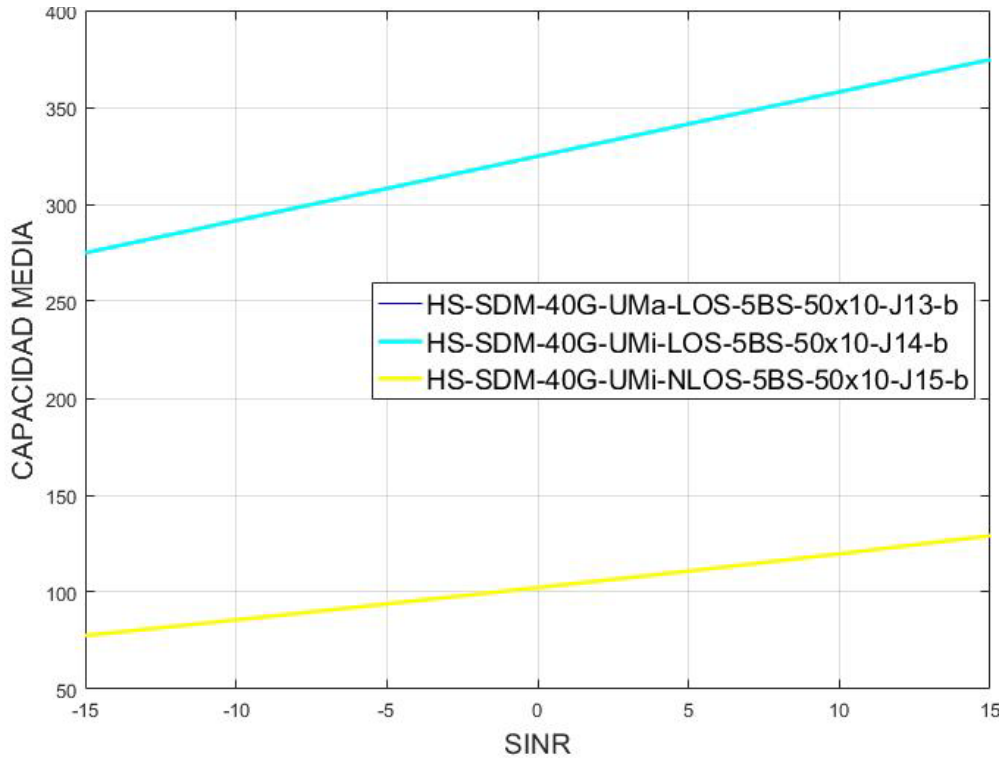
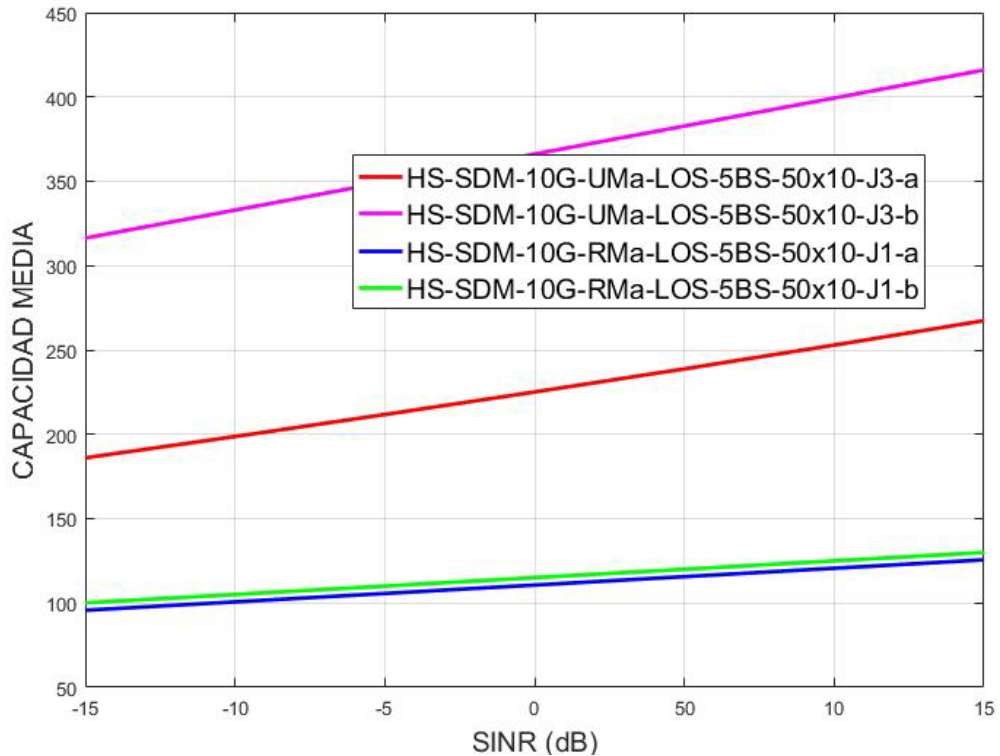


figura 5-37. Comparativa a 28 GHZ. Sistema No correlado. HS-SDM-5BS-40G-50x10-b.

En la frecuencia de 40 GHz decrece algo más la capacidad, pero no excesivamente. Se mantiene la tendencia de las capacidades a las otras inferiores.

### 5.9.3 Comparativa de sistemas correlados y no correlados.

En la siguiente gráfica 5.38 se presenta las capacidades de los sistemas RMa y UMa correlados y No correlados a una frecuencia de 10 GHz, para apreciar mejor las variaciones. No se presenta a las otras frecuencias analizadas porque el comportamiento de los sistemas en las 3 frecuencias es similar, disminuyendo un poco la capacidad, pero al igual en los tres escenarios.



**Figura 5-38. Comparativa a 10 GHZ. Sistemas RMa y UMa, correl. y No correl**

Se observa en la figura 5.38 que el sistema que tiene mayor capacidad es el escenario de trabajo UMa, (que es el mismo que el valor para UMi), en el caso no correlado. Del estado correlado a No correlado la capacidad baja más de 100 bit/Hz/sg. En cambio, el sistema para el escenario RMa tiene una capacidad mucho más baja, tanto en caso correlado como no correlado, que son de valores parecidos. En el escenario RMa, apenas existen diferencias de los valores de capacidad entre los sistemas correlados y no correlados.

El resto de frecuencias no se comparan en los gráficos como el anterior, ya que se ha observado que, en los dos casos de frecuencia, todos disminuyen de forma análoga al aumentar la frecuencia.

### 5.10 Análisis sistema DMIMO con 2 BS. Sistemas 50x10

Se repite el análisis del punto anterior, variando el número de antenas y el número de BS que componen cada sistema DMIMO. Se eligen 50 antenas transmisoras y 10 antenas receptoras.

Se analiza el comportamiento de los sistemas DMIMO en los diferentes entornos, en sistemas DMIMO, RMa, UMa, y UMi, en visión LOS y NLOS, para 10, 28 y 40 GHz, en las distancias de 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 y 100 metros.

PARA TODOS LOS SISTEMAS LAS MISMAS ANTENAS RECEPTORAS  
Antenas receptoras 10.

ANTENAS TRANSMISORAS 1:25 En cada BS, tomo 2 BS, en total 50 antenas transmisoras.

Número de localizaciones 10.

Distancias entre las antenas tx, 0,1;; Distancias entre las antenas receptoras 0,1.

Ancho del lóbulo: 10°

Solo se calcula la capacidad para 1 valor de SINR, 0 dB . Solo evalúo a una frecuencia.

Se calcula la capacidad para 8 sistemas DMIMO, formado cada uno por 2 BS, la primera BS situada a 10 metros y la segunda va variando desde los 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 y 100 metros, de forma que la combinación de la BS1 (a 10 metros) con cada una de las otras BS da lugar a 8 sistemas diferentes, en función de la separación a que se encuentra la segunda BS.

Según esto, se tienen 8 matrices H1.....H8, con las que se mide la capacidad.

En este documento se representa la CM por ser el valor más representativo del comportamiento del sistema.

Cada sistema analizado se nombrará como K(i)

Tabla 5.22, con los sistemas a analizados:

SISTEMA	ESCENARIO	VISIBILIDAD	FRECUENCIA
SISTEMA K1	RMa	LOS	10 GHz
SISTEMA K2	RMa	NLOS	10 GHz
SISTEMA K3	RMa	LOS	28 GHz
SISTEMA K4	RMa	NLOS	28 GHz
SISTEMA K5	UMa	LOS	10 GHz
SISTEMA K6	UMa	NLOS	10 GHz
SISTEMA K7	UMa	LOS	28 GHz
SISTEMA K8	UMa	NLOS	28 GHz
SISTEMA K9	UMa	LOS	40 GHz
SISTEMA K10	UMi	LOS	10 GHz
SISTEMA K11	UMi	NLOS	10 GHz
SISTEMA K12	UMi	LOS	28 GHz
SISTEMA K13	UMi	NLOS	28 GHz
SISTEMA K14	UMi	LOS	40 GHz
SISTEMA K15	UMi	NLOS	40 GHz

Tabla 5-22. Escenarios analizados. HS-SDM-2BS-50x10

### 5.10.1 Análisis escenario RMa

El sistema se nombrará como HS-DM-SDM-2BS-RMa-50x10.

Indica un sistema obtenido a través de matriz simulada, HS. Sistema Distribuido MIMO Masivo, DM-SDM. Sistema con 2BS. Escenario RMa. 50 antenas transmisoras x 10 antenas receptoras.

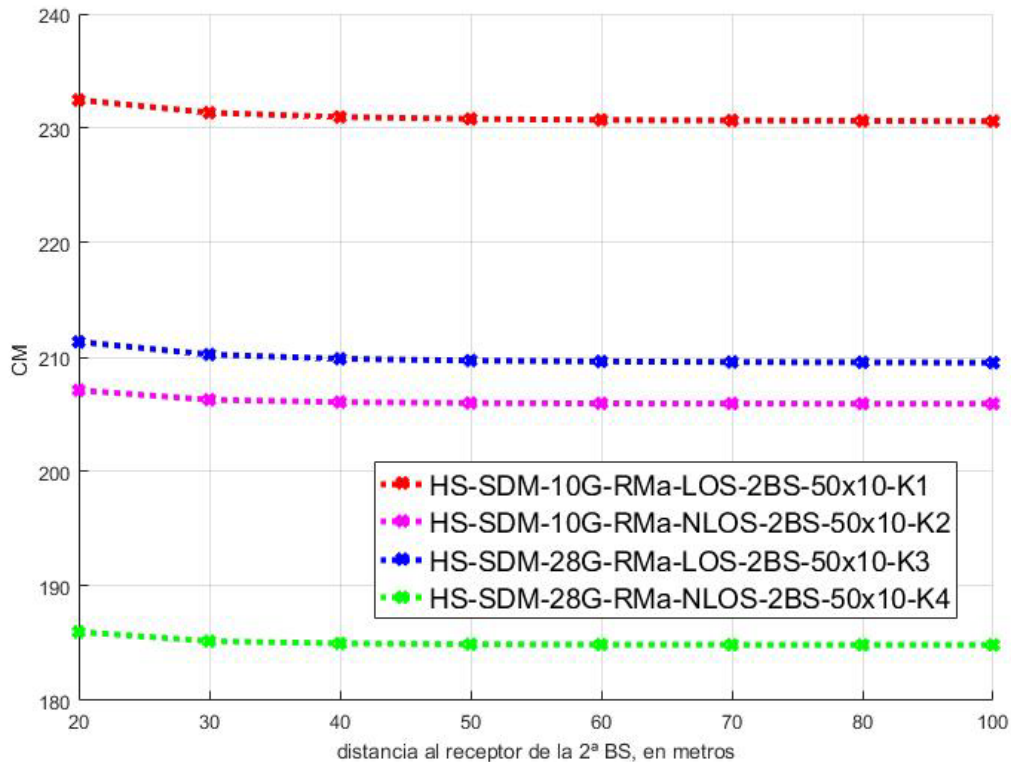


Figura 5-39. Comparativa RMa. HS-SDM-2BS-RMa-50x10

En la figura 5.39, se observa que al empezar a alejar la segunda BS la capacidad disminuye algo, y a partir de los 30 metros, apenas disminuye. También se observa que para las frecuencias de 10 GHz y 28 GHz las capacidades toman sus valores máximos en visibilidad directa, LOS. En visibilidad no directa NLOS, las capacidades disminuyen, pero no excesivamente, manteniendo valores aceptables de comunicación.

El comportamiento es muy similar al caso anterior de 30x40 antenas en transmisión y recepción, en cuanto a que el valor máximo lo obtiene para la 2ª BS situada muy cercana al receptor, y que al alejarnos a la distancia máxima la capacidad decrece, pero aproximadamente un 1%.

En cambio, lo que sí es apreciable, es que el valor máximo de la capacidad en el sistema del punto anterior de 30x40 antenas en visión LOS era de 138 y en visión NLOS era de 115 y en este sistema de 50x10 antenas, en visión LOS es de 232,5 y en visión NLOS es de 211,3. Se ha incrementado en más de un 50%, cuando en total tenemos un número menor de antenas.

### 5.10.2 Análisis escenario UMa

El sistema se nombrará como HS-DM-SDM-2BS-UMa-50x10.

Indica un sistema obtenido a través de matriz simulada, HS. Sistema Distribuido MIMO Masivo, DM-SDM. Sistema con 2BS. Escenario UMa. 50 antenas transmisoras x 10 antenas receptoras.

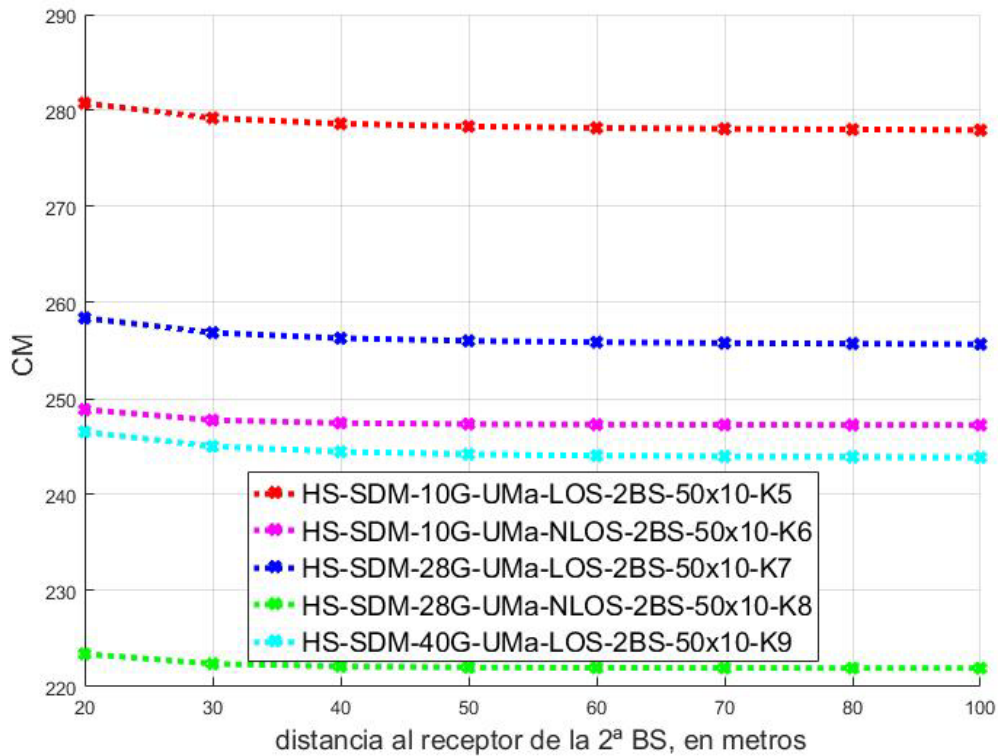


Figura 5-40. Comparativa UMa. HS-SDM-2BS-UMa-50x10

Analizando la figura 5.40, en entorno UMa, vemos que el comportamiento en visión LOS es parecido al entorno RMa. Es decir, el valor de la CM, el valor máximo en visión LOS a 10 GHz de frecuencia para antenas 30x40 es de 152, y en antenas de 50x10 el valor de CM es de 280. Valor muy superior, lo que confirma el comportamiento del caso anterior, que, al aumentar las antenas en transmisión, obtenemos un valor de capacidad de transmisión mucho mejor que al aumentarlas en recepción. En frecuencia de 28 GHz los valores de CM disminuyen casi tanto como en la simulación anterior de 30x40 antenas, y vuelve a disminuir al subir a los 40 GHz, aunque la disminución en este caso es menor, casi la mitad.

En cambio, en visión NLOS, el comportamiento es distinto. En frecuencia de 10 GHz con antenas 50x10 en visión NLOS, el valor máximo de CM es de 248,5, y con antenas 30x40 el valor máximo de CM es de 5,35. Y después decae el valor máximo exponencialmente, un 1% para las 2ª BS más alejadas, en los dos casos de antenas. El tema importante, no es solo que decaiga la capacidad, sino que en el sistema de antenas 30x40 no permitiría la comunicación en visión NLOS, y en el sistema de 50x10 sí que se permite la comunicación, y con valores altos de CM. Al aumentar la frecuencia la capacidad decae en los dos casos de sistemas, pero el resultado no varía apreciablemente.

### 5.10.3 Análisis el escenario UMi

El sistema se nombrará como HS-DM-SDM-2BS-RMi-50x10.

Indica un sistema obtenido a través de matriz simulada, HS. Sistema Distribuido MIMO Masivo, DM-SDM. Sistema con 2BS. Escenario RMi. 50 antenas transmisoras x 10 antenas receptoras.

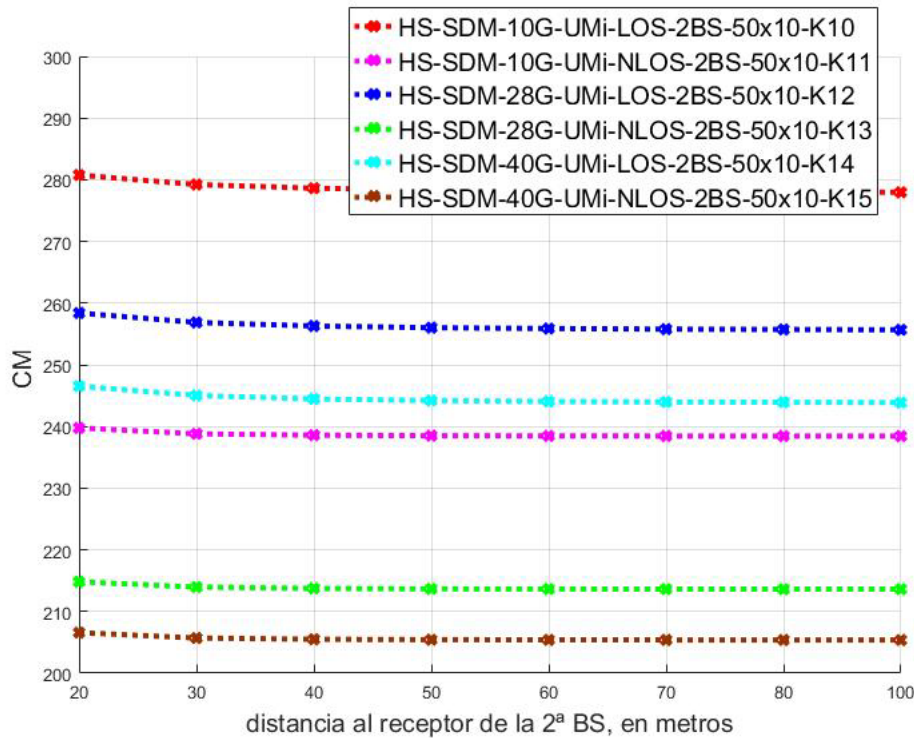


Figura 5-41. Comparativa UMi. HS-SDM-3BS-UMi-50x10

En la figura 5.41, se observa que el comportamiento del entorno UMi es muy parecido al entorno UMa. En visión LOS, la capacidad media es mucho mayor en el sistema de 50x10 que en el sistema de 30x40. Y en visión NLOS, aunque la CM para sistema de antenas de 30x40, y para valores de frecuencia de 10GHz es del orden de 25, y en el sistema de antenas de 50x10 es del orden de 280,55, el detalle importante, es que en el sistema de antenas de 50x10 el valor de la CM permite la comunicación en visión NLOS, y con el sistema de antenas de 30x40 no se permite la comunicación en visión NLOS.

Al subir la frecuencia la CM baja proporcionalmente en todos los casos, con lo cual se mantienen las conclusiones.

#### 5.10.4 Comparación diferentes escenarios y visibilidad

En el siguiente gráfico 5.42, se representa los valores de CM para los 3 escenarios. Solo se presenta a frecuencia de 10 GHz, ya que, en el resto de frecuencias, como se ha observado en las figuras anteriores, la CM disminuye de una forma casi igual en los 3 escenarios.



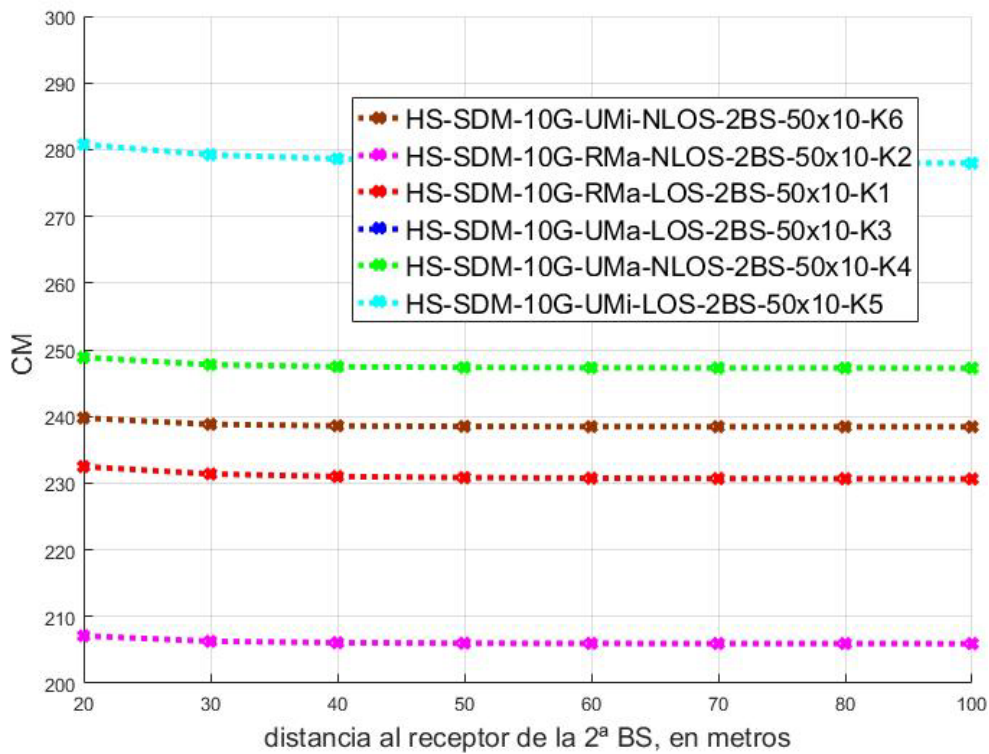


Figura 5-42. Comparativa escenarios y visibilidad HS-SDM-2BS-50x10

Los escenarios UMa y UMi en visibilidad LOS tienen las líneas superpuestas y de valores de CM los más altos. En el escenario RMa con visibilidad LOS tiene los valores más bajos, pero siguen siendo buenos. En visibilidad NLOS los 3 escenarios disminuyen la CM, y entre los escenarios urbanos, el escenario UMi disminuye del orden de 10 Bits/sg/Hz más que el UMa. El valor más bajo de CM es el de RMa NLOS, pero está en valores de 205 bits/sg/Hz, que son mucho más altos que el caso de 30x40 antenas con 2 BS.

### 5.11 Conclusiones.

En este capítulo de la tesis se comienza con un análisis en el que el análisis que se realiza consiste en comparar 3 sistemas MIMO con 30x4 antenas, a las tres frecuencias, 28, 40 y 78 GHz, situadas las BS a diferentes distancias, y en los 3 escenarios de propagación, y se observa que la capacidad no influye de una manera importante, ni con la distancia, ni con la frecuencia, ni en el entorno en el que estemos trabajando.

Se continúa el análisis, en segundo lugar, con 3 sistemas DMIMO formado por 3 BS cada sistema en el que se realizan dos análisis, uno con el sistema correlado y otro con el sistema no correlado. Se calcula la capacidad de los sistemas para los 3 escenarios de trabajo y en las frecuencias de 28, 40 y 78 GHz. Los resultados son que las capacidades son muy parecidas para los 3 escenarios, aunque lógicamente para el caso de no correlado las capacidades aumentan, pero no de una forma importante. Las diferencias de capacidad entre los sistemas correlados y no

correlados, para este análisis son del orden de 2 bit/sg/Hz. Las variaciones de capacidad con las frecuencias son mínimas. Las capacidades son algo mayor en el escenario UMi, posteriormente en el escenario UMa, y por último en el escenario RMa. La capacidad en los escenarios urbanos es mayor que en el escenario rural. El resultado es que estos sistemas DMIMO tienen capacidades parecidas a los sistemas MIMO anteriores, también de 30x4 antenas totales, y que no hay variaciones importantes con respecto al escenario de propagación.

Se analizan en tercer lugar, sistemas DM-MIMO situando a diferentes distancias el transmisor y el receptor, y se estudia como varía la capacidad al separar el transmisor y receptor, y especialmente se compara como afecta la visión LOS y NLOS. Son sistemas DMIMO formados por 2BS, de 30x4 antenas en los que la segunda BS se va separando del receptor en cada sistema.

La capacidad en el entorno RMa, tanto en propagación LOS como NLOS tiene unos valores aceptables de capacidad. Se observa también que al pasar de LOS a NLOS en las dos frecuencias, 10 GHz y 28 GHz, la capacidad media disminuye unos 20 bit/sg/Hz en las dos frecuencias. En el análisis en el escenario los valores de capacidad en visión LOS son un poco mayores que en el escenario RMa, tiene unos valores de capacidad alrededor de 150 Bits/sg/Hz para las 3 frecuencias analizadas. Para visión NLOS, para UMa las capacidades disminuyen mucho tanto a la frecuencia de 10 GHz como a 28 GHz, tanto que están por debajo de 10 Bits/sg/Hz. En el escenario UMi los valores de capacidad para los casos de visibilidad LOS en las 3 frecuencias son muy parecidos a los valores obtenidos para el escenario UMa, anterior. En cambio, en los casos de visibilidad NLOS, aunque también disminuyen mucho, como en el escenario anterior, los valores de capacidad no son tan bajos, así para el caso de frecuencia 10 GHz, NLOS, el valor de capacidad oscila por unos 25 bits/sg/Hz para todas las distancias.

Para los escenarios UMa y UMi, en visibilidad NLOS, la capacidad disminuye mucho, especialmente en el escenario UMa, y no permite la comunicación.

El cuarto análisis consiste en analizar 12 sistemas MIMO y DMIMO, todos con el mismo número de antenas totales de 30x4 antenas. Los sistemas DMIMO están formados por 3 BS a diferentes distancias en los casos correlados y no correlados, y los sistemas MIMO analizados a distancias diferentes. Todo ellos se analizan en diferentes escenarios y frecuencias. Los resultados que se obtienen, son en primer lugar que las variaciones de capacidad para las diferentes frecuencias son pequeños, y en 2º lugar que es que el peor caso es para los sistemas DMIMO escenario RMa. Es de notar que los sistemas DMIMO en los tres escenarios tienen menor capacidad que los sistemas MIMO para estos números de antenas y de BS. El que tiene mayor capacidad es el sistema MIMO separados 10 metros el transmisor y receptor. Dentro de los sistemas DMIMO analizados, en cada escenario, tienen mayor capacidad, o menos diferencia respecto al valor teórico máximo, los sistemas menos correlados.

En quinto análisis son sistemas DM-MIMO formados por 60 antenas transmisoras y 4 receptoras. Se analiza como varia la capacidad en cada frecuencias y escenario. Se comporta igual que el sistema DMIMO de 30x4 antenas, pero aumentando los



valores de capacidad, al aumentar el número de antenas transmisoras. El aumento de capacidad no son valores grandes que aconsejen duplicar el número de antenas transmisoras.

El sexto análisis es de sistemas MIMO con un número de antenas 30x10, situadas las BS a diferentes distancias del receptor, y calculando la capacidad a diferentes frecuencias y en visibilidad directa y no directa, se observa que la capacidad disminuye casi linealmente con la distancia para todos los escenarios, y para el escenario de propagación RMa, la capacidad toma valores altos tanto en visibilidad directa como No visibilidad directa, y la comunicación es posible, atenuándose la capacidad con la frecuencia y la distancia, lo cual es normal. En cambio, en entornos UMA y UMi con visibilidad no directa, NLOS, la comunicación no es posible, ya que la capacidad es demasiado baja.

El séptimo análisis es de sistemas DMIMO formados por 5 BS cada una, situada a diferentes distancias el trasmisor del receptor, con un número de antenas totales de 50x10 en el sistema. Se analiza en dos condiciones con sistemas correlados y no correlados, calculando la capacidad para cada SINR. En el sistema correlado se observa, como es lógico, que la capacidad crece conforme aumenta la SINR, para todos los entornos de propagación y atenuándose conforme subimos en frecuencia. En los sistemas no correlados, el comportamiento es similar, con valores bastante más altos de capacidad, especialmente en los escenarios de propagación UMA y UMi. La capacidad es mucho más alta en los escenarios urbanos que en el escenario rural.

El último y octavo análisis consiste en analizar diferentes sistemas DMIMO, cada uno formado por 2 BS, en la que la 1ª BS está situada cerca del receptor, y la segunda va aumentando la distancia de 10 metros hasta 100 metros. Los sistemas están formados por 50x10 antenas. Las antenas transmisoras son 25 en cada BS. Se calcula la capacidad de cada sistema DMIMO a una sola frecuencia y una sola SINR, 0 dB, de forma que se estudia como varía la capacidad a diferentes frecuencias, entornos de propagación y de visibilidad. En el análisis se observa que la capacidad en general baja al tomar la 2ª BS alejadas, pero apenas un 1% del valor máximo al valor mínimo. La capacidad en el entorno de propagación RMa, tiene valores buenos tanto en visibilidad directa como no directa, y en las diferentes frecuencias. En cambio, en el entorno de propagación, con visibilidad No directa, NLOS, la capacidad es muy baja, tanto que no sería posible la comunicación. Lo mismo ocurre en el entorno UMi, aunque la capacidad en NLOS es más alta, pero sigue siendo baja.

## 6. REALIZACIÓN DE UN MODELO DE APAGADO DE CELDAS EN REDES ULTRADENSAS 5G

### 6.1 Introducción

Como se ha descrito anteriormente en esta tesis se producirá un gran cambio con la implantación de la nueva tecnología 5G. Se ha estudiado en los anteriores capítulos diferentes sistemas MIMO, MIMO masivos, DMIMO y DMIMO masivos, en los que se les ha calculado la capacidad, la correlación y el balanceo de potencia, en diferentes frecuencias y escenarios. No obstante, otro de los desafíos que se enfrenta la tecnología 5G es el consumo de potencia. Los objetivos esperados que debe cumplir la tecnología 5G son la alta velocidad, bajos tiempos de latencia, alta conectividad, y bajo consumo. Hasta ahora en esta tesis nos hemos centrado en las condiciones óptimas para la obtención de la máxima capacidad. Ahora queremos mantener esa capacidad máxima y reducir el consumo energético. Para reducir el consumo energético y mantener altas capacidades es necesario un cambio en las arquitecturas de diseño de las redes móviles. Las nuevas arquitecturas buscarán el uso de celdas muy pequeñas para poder aumentar el reuso de frecuencias y así aumentar la eficiencia espectral. Así hablamos de microceldas, pico celdas y femtoceldas. El uso de celdas muy pequeñas producirá la existencia de BS muy cercanas entre sí, dando lugar a las Redes Ultradensas (UDN). La existencia de UDNs y la alta movilidad de los usuarios provocará una gran diferencia en la carga entre las distintas estaciones base. Para reducir el consumo de la red en general es posible apagar las celdas con una menor carga de tráfico o las celdas sin tráfico.

Aunque la tecnología 5G coexistirá con otras tecnologías y trabajará con macroceldas, también lo hará con celdas pequeñas, que darán lugar a las UDNs. En este tipo de redes de tamaños muy pequeños, el número de celdas llega a ser mayor que el número de usuarios en determinadas condiciones de tráfico (movilidad de usuarios y patrones de tráfico según horas). Llamando  $\lambda_{BS}$  la densidad de BS y a  $\lambda_{UE}$  la densidad de equipos de usuarios, en las redes ultra densas se cumple que  $\lambda_{BS}$  es similar  $\lambda_{UE}$ . Se considera que una red es ultradensa cuando cumple que el número de celdas /km<sup>2</sup> > 10<sup>3</sup> [90]. Las redes 5 G, tendrán en muchos casos una alta densidad de celdas, por encima de 50 BSs/km<sup>2</sup> [91], lo que las convierte directamente en muchos casos en red ultradensas.

En las redes ultradensas los usuarios estarán muy próximos entre sí, y ello producirá interferencias en la señal. Otra consecuencia, es que las transmisiones se producirán en su gran mayoría en visibilidad directa (LOS) al existir distancias muy pequeñas entre los usuarios y las estaciones base. La alta densidad de las BS en las redes ultra densas no solo se produce en el plano horizontal, sino también en el

plano vertical, ya que una gran parte de las conexiones de los dispositivos, se realiza en los bloques de viviendas, oficinas, apartamentos, etc. Esto obliga a diseñar modelos de redes que tengan en cuenta este hecho [52].

Como consecuencia de trabajar con UDN el consumo de energía aumentará considerablemente, ya que habrá un número muy grande de BS emitiendo y recibiendo señales, y las BS son los dispositivos que más consumen en las redes celulares, independientemente de su carga.

Es este capítulo se ha modelado el consumo energético de una red ultradensa, al tiempo que se ha desarrollado un simulador que calcula la potencia recibida, la SINR y la capacidad por usuario basándose en los desarrollos de los capítulos anteriores. Además, se ha aplicado un modelo de movilidad para los usuarios y se han diseñado diferentes algoritmos de asignación entre usuarios y estaciones base. Por último, se han aplicado algoritmos metaheurísticos para decidir que estaciones base se apagan con el doble objetivo de minimizar el consumo y maximizar la capacidad.

## 6.2 Consumo energético en las redes 5G.

El aumento exponencial del consumo energético tendría unas consecuencias nefastas para el medio ambiente, debido a unas emisiones muy altas de CO<sub>2</sub>, como se pueden ver en la figura número 6.1.

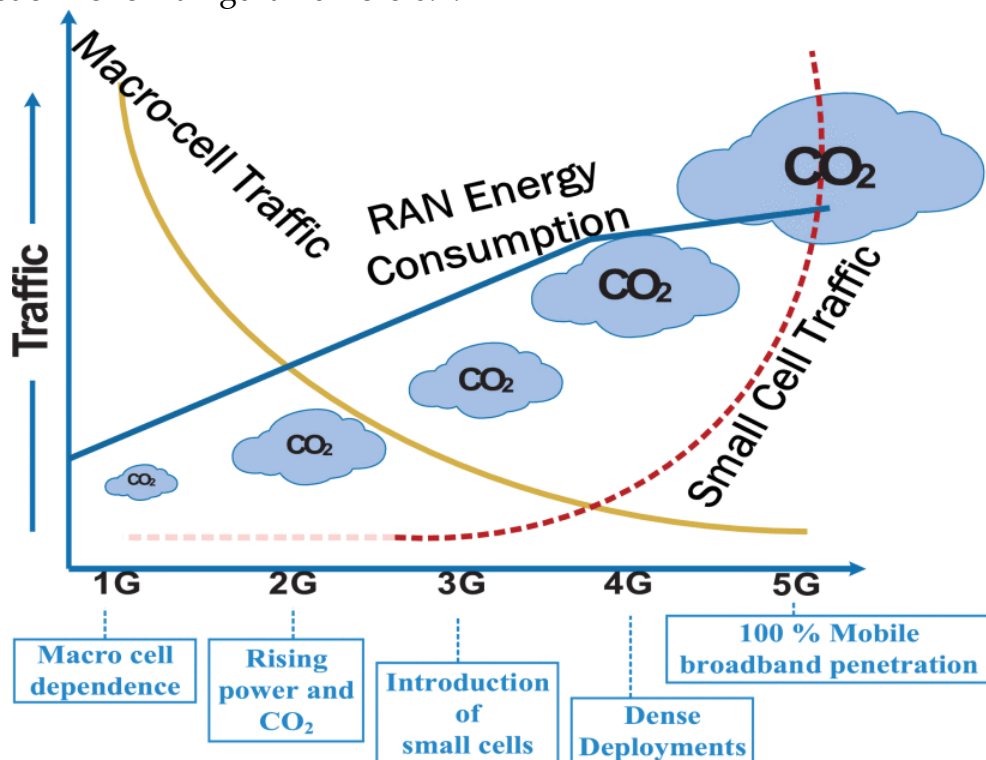
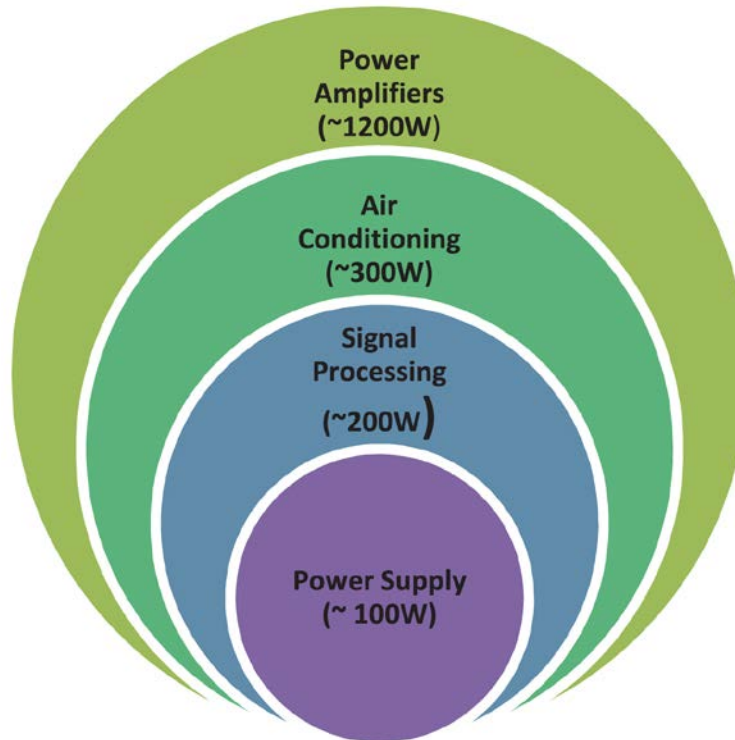


Figura 6-1. Consumo energético y emisiones de CO<sub>2</sub>. [92]

Es importante tener en cuenta que, en la energía consumida por las BS, la gran mayoría de ésta es consumida por los aires acondicionados y los amplificadores de

potencia. Esto solo se reduce apagando la BS cuando no esté dando servicio a ningún usuario. Los consumos en una BS se aprecian en la figura 6.2 siguiente.



**Figura 6-2. Consumos energéticos en las BS. [92]**

Por tanto, parece claro una buena estrategia puede ser apagar un número determinado de BS. La primera opción, es apagar las BS que no esten dando servicio a UE. A partir de esta opción sencilla, el número de celdas que se apagan y el número de trasposos que se realizan para minimizar la energía consumida impidiendo la degradación de la capacidad es un problema complicado. Este problema se ha denominado en la literatura el problema de apagado de celdas (Cell Switch Off, [93] [94] [95], según se realice. Así se tiene CSO online, cuando el apagado de las BS se realiza en tiempo real. Este CSO online se conoce también como CSO dinámico. Este desarrollo implica un conocimiento en tiempo real del estado de la red. Según sea el tiempo de reacción, tenemos CSO online de reacción rápida, cuando el tiempo de reacción a los cambios del UE son de algunos segundos, o de reacción lenta, cuando la respuesta a los cambios del UE es de algunos minutos. La otra clasificación es CSO off line, en la que la activación o apagado de la celda está pre estudiado. Es decir, se ha decidido anteriormente qué celdas estarán activas y cuales apagadas. Esto se conoce como CSO estático, porque la decisión acerca del estado de las celdas se toma para periodos de tiempo largos, del orden de horas. También se puede dividir en CSO estático, en el cual la decisión de qué celdas están apagadas o encendidas es en función de dónde estén situadas, y CSO ordinario, en el cual la decisión se toma en función de la forma de las celdas.

No obstante, la decisión de qué celda es la que se apaga no es un problema que dependa solo del consumo de energía, sino que depende de otros factores importantes para una red de telecomunicaciones como son la capacidad por usuario o la calidad de servicio. Aquí es donde entra la importancia del modelado, los

resultados tendrán validez en función de la precisión que tenga el modelado y en este modelo propuesto se utilizan todos los avances desarrollados en los capítulos anteriores.

### 6.3 Modelo del sistema.

El modelo físico del sistema sobre el que se trabaja es un área de 500 m<sup>2</sup>, que se ha sincretizado resultando 100X100 puntos, donde cada uno tiene un área de 25 m<sup>2</sup>. Todas las BS emiten con potencia constante. Se toman 10 tipos de regiones diferentes, para simular diferentes condiciones de propagación, que son generadas aleatoriamente. Mediante una teselación de Voroni se ha creado los diferentes espacios asignados a cada celda.

#### 6.3.1 Potencia recibida

La potencia recibida en cada punto se define como:

$$P_{rx}[dBm] = P_{tx}[dBm] + P_{Loss}[dB], \quad \text{Ecuación 6-1}$$

Siendo  $P_{rx}[dBm]$ , la potencia recibida en dBm,  $P_{tx}[dBm]$ , la potencia transmitida en dBm,  $P_{Loss}[dB]$ , las pérdidas de propagación, que dependerán de cada región. Las pérdidas de propagación se detallan como:

$$P_{Loss}[dB] = GA + PA \quad \text{Ecuación 6-2}$$

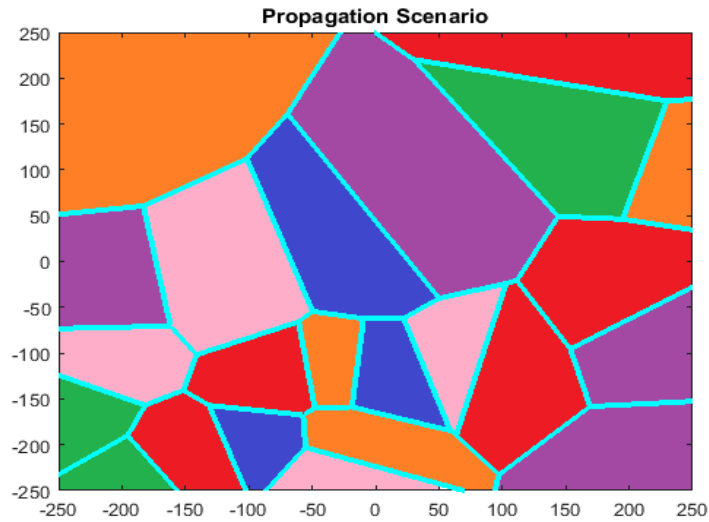
Donde GA son las ganancias de las antenas transmisoras y receptoras, y PA son las pérdidas de propagación en el espacio, que se calculan como:

$$PA[dB] = \left(\frac{\lambda}{2\pi * d}\right)^k \quad \text{Ecuación 6-3}$$

Siendo “d” la distancia del UE a la BS, y “k” el exponente de pérdidas dependiente, cuyo valor dependerá de la región de propagación.

Estos son los cálculos de la potencia recibida estándar. La mejora que se ha hecho consiste en calcular la potencia recibida para cada una de las regiones concretas. Se ha realizado el cálculo exacto de la potencia en cada región, a partir del uso del simulador NYUSIM, ya comentado en esta tesis. Se han simulado 6 escenarios diferentes en los ambientes UMa, RMa y UMi, y pada cada caso, a partir de la distancia entre MS y UE, se obtiene la potencia recibida.

En orden a evaluar las pérdidas de propagación PA, de la ecuación 6.3, se divide el modelo físico en 23 zonas de propagación diferentes aleatorias, tomando para cada zona de escenario unas condiciones de propagación elegidas aleatoriamente entre RMa, UMi, UMa con LOS y NLOS. Para hallar las pérdidas de propagación en el enlace entre la BS y el UE, se ha usado el modelo del simulador NYUSIM, [96]. Las 23 divisiones del terreno se muestran en la figura 6.3, en las que cada zona tiene diferentes escenarios de propagación, con diferentes pérdidas.



**Figura 6-3. Diferentes escenarios de propagación. Naranja “UMA LOS”, Rosa “UMA NLOS” Rojo “UMi LOS”, Púrpura “UMi NLOS” Azul “RMa LOS” y Verde “RMa NLOS”. [97]**

### 6.3.2 Relación señal Interferencia más ruido (SINR)

La relación señal interferencia más ruido que se recibe en el UE llamado “k”, se calcula como:

$$SINR_k = \frac{P_{rx,j,k}[mw]}{\sum_{i=1}^M P_{rx,i,k}[mw] - P_{rx,j,k}[mw] + P_n[mw]} \quad \text{Ecuación 6-4}$$

Siendo  $P_{rx,j,k}[mw]$ , la potencia recibidas por el UE “k” conectado a al BS “j”.

La suma del denominador corresponde a la suma de todas las potencias recibidas por el UE “k” desde todas las BS menos desde la BS “j”, más la potencia de ruido técnico, que se calcula como:

$$P_n[mw] = -174 + 10 \log_{10} BW_j \quad \text{Ecuación 6-5}$$

Siendo  $BW_j$  el ancho de banda de la BS “j”

### 6.3.3 Capacidad

La capacidad es ha calculado y explicado su cálculo en esta tesis en los capítulos anteriores, pero se detalla en este apartado para aplicarlo a los UE concretos de este desarrollo.

Así la capacidad del UE “k” se calcula como: De la misma forma que se ha calculado en los capítulos anteriores en las ecuaciones 2-1, y 2-2.

$$C_k[bps] = BW_k^j[Hz] * \log_2(1 + SINR_k) \quad \text{Ecuación 6-6}$$

Siendo  $BW_k^j[Hz]$ , el ancho de asignado al UE “k” que está conectado a la BS “j”.

El ancho de banda que se asigna a cada usuario k, se calcula como:

$$BW_k^j[Hz] = \frac{BW_j[Hz]}{N_j} \quad \text{Ecuación 6-7}$$

Siendo  $N_j$  el número de usuarios conectados a la BS “j”.

### 6.3.4 Potencia consumida por las celdas

Una primera forma sencilla de calcular de potencia consumida por las BS en cada celda sería la expresión [98]:

$$P_j = 4,7 * P_{base} * P_{tx} \quad \text{Ecuación 6-8}$$

Siendo  $P_j$  la potencia consumida en la BS  $j$ .  $P_{base}$  la potencia consumida básica en la BS, y  $P_{tx}$  la potencia transmitida.

Este modelo no tiene en cuenta el tipo de BS, ni los datos que emite. Un modelo más correcto sería:

$$P_j = \alpha * P + \beta + \delta * S + \rho \quad \text{Ecuación 6-9}$$

Donde  $P_j$  es la potencia radiada,  $\alpha$  es la eficiencia de transmisión debida a los amplificadores de radio frecuencia y las pérdidas de alimentación,  $\beta$  es la potencia disipada en el proceso de señal y en el enfriamiento del lugar,  $\delta$  es la potencia consumida por unidad de dato, siendo  $S$  la demanda de tráfico servido por la BS, y  $\rho$  la potencia consumida por el dispositivo.

Con esta mejora se calcula la potencia consumida de una forma dinámica, ya que tiene en cuenta la potencia consumida por unidad de datos y la demanda de tráfico en el momento exacto del cálculo.

Estos cálculos se calculan con una función llamada “powerConsumption”.

### 6.3.5 Dinamismo. Movilidad de usuario.

El considerar que los usuarios se sitúan dentro de cada celda de forma permanente, está lejos de la realidad. Los usuarios se mueven, y esto afecta a nuestro trabajo. Al moverse los usuarios cambian de la celda en la que están asignados y pasan a otra en el proceso conocido como handovers. Existen muchos desarrollo de modelos de movilidad de usuarios [99], como los que se pueden ver en la figura 6.4.

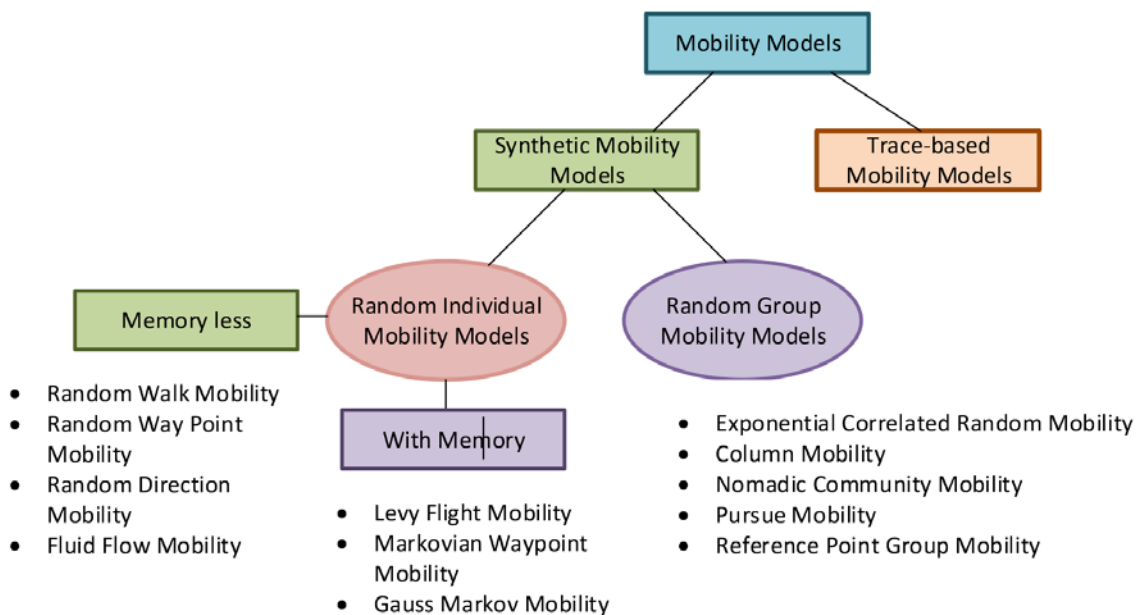


Figura 6-4 .Diferentes modelos de movilidad aplicables al análisis de redes celulares [99].

En este trabajo se usará el llamado modelo Random Way Point Mobility (RWP), que es una ampliación de del modelo Random Walk Mobility.

En el Random Walk Mobility, el usuario aleatoriamente elige una dirección y una velocidad. En cada nuevo movimiento el usuario elige aleatoria y uniformemente la dirección entre  $[0 \text{ y } 2\pi]$ , y la velocidad como una distribución uniforme entre los valores  $[V_{\min}, V_{\max}]$ . En el modelo RWP se añade una pausa entre los cambios en la dirección o en la velocidad.

#### **6.4 Optimización del consumo energético.**

Para estas pruebas iniciales, se va a considerar un sistema compuesto únicamente por celdas pequeñas, es decir, existirá un sistema de macroceldas que controlará el sistema completo, pero aquí lo obviamos. Para analizar un modelo de celdas ultradensas nos basamos en el modelo propuesto por López-Pérez y otros [98]. Se considerará un escenario cuadrado con unas dimensiones de  $500 \times 500$  y una distribución aleatoria de las celdas. Se cogerá 28, 56, 112, 224, 448, 952, 2884, 11536 celdas pequeñas por  $\text{km}^2$  que corresponden aproximadamente a una distancia entre estaciones base de 200, 150, 100, 75, 50, 35, 20 y 10 metros entre estación en el caso de un desarrollo hexagonal. En nuestro caso se ha preferido un desarrollo puramente aleatorio. Se han escogido densidades de usuarios alrededor de la estimada en Manhattan [98], que es de 300 UE activos por  $\text{km}^2$ , por tanto, se han elegido densidades que van desde los 100 hasta los 500 usuarios por  $\text{km}^2$ .

Para reflejar una red lo más heterogénea (será la que tengan los operadores cuando comience el despliegue de las redes 5G y coexistan con las anteriores generaciones de estaciones base), se han desarrollado 7 tipos diferentes de estaciones base, cada una de ellas a una frecuencia diferente (2.0, 3.5, 5, 10, 14, 28 y 70 GHz) con un ancho de banda disponible del 5% de la frecuencia de la portadora, es decir, (100, 175, 250, 500, 700, 1400 y 3500 MHz). La potencia usada para transmitir ha sido uno de los parámetros de diseño de la última generación de comunicaciones móviles. Se tiene como objetivo maximizar la SINR evitando interferencias entre celdas vecinas, al tiempo que se reduzca al máximo la potencia consumida con el objetivo de producir un ahorro energético. Normalmente se usa el criterio que los UE se conectan a la estación base de la cual reciben más señal. Sin embargo, esta planificación puede que no sea la más idónea en los futuros sistemas 5G a la hora de optimizar los recursos.

En [100] se define la potencia transmitida como la potencia necesaria para tener una determinada SINR en el borde de la celda. Esto se puede llevar a cabo cuando existe una distribución más o menos regular de las BS, sin embargo, cuando la distribución es aleatoria totalmente es más complicado definir este parámetro. Otra opción es hacer que todas las BS transmitan la misma potencia, esta opción teniendo en cuenta las diferentes condiciones de propagación a las diferentes frecuencias hará que las diferentes BS tengan un radio de cobertura diferente. En este apartado se van a presentar los resultados de cuatro estrategias diferentes que son las configuraciones



de la A a la D. En la configuración A, todas las BS transmiten la misma potencia, en esta configuración el radio de cobertura de las estaciones con menor frecuencia será mayor debido a que las pérdidas de propagación son menores. En el escenario B, se disminuye la potencia a transmitir conforme vamos disminuyendo la frecuencia. A partir de este escenario, los escenarios del C al E se desbalancea la potencia cada vez más, tomando como eje central las estaciones BS con una frecuencia de funcionamiento de 10 GHz. Las potencias asignadas se muestran en la tabla 6.1.

BS	f (GHz)	Power Transmitted (mW)			
		Conf. A	Conf. B	Conf. C	Conf. D
1	2	125	2	1	0.5
2	3.5	125	7	5	1
3	5	125	13	10	5
4	10	125	25	25	25
5	14	125	50	75	100
6	28	125	100	150	200
7	66	125	125	250	350

Tabla 6-1. Potencias emitidas por cada BS en cada configuración.

En las figuras 6.5 y 6.6 se puede ver la distribución de cómo se conectan los usuarios a las diferentes estaciones base, según el tipo de configuración de potencia

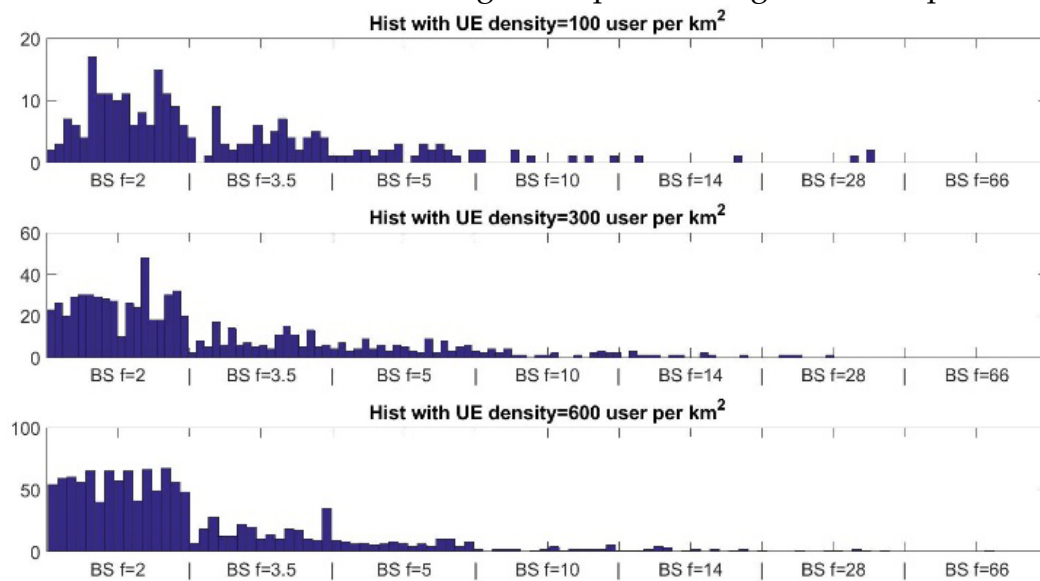


Figura 6-5. Distribución de Usuarios por tipo de BS para una potencia distribuida configuración: A

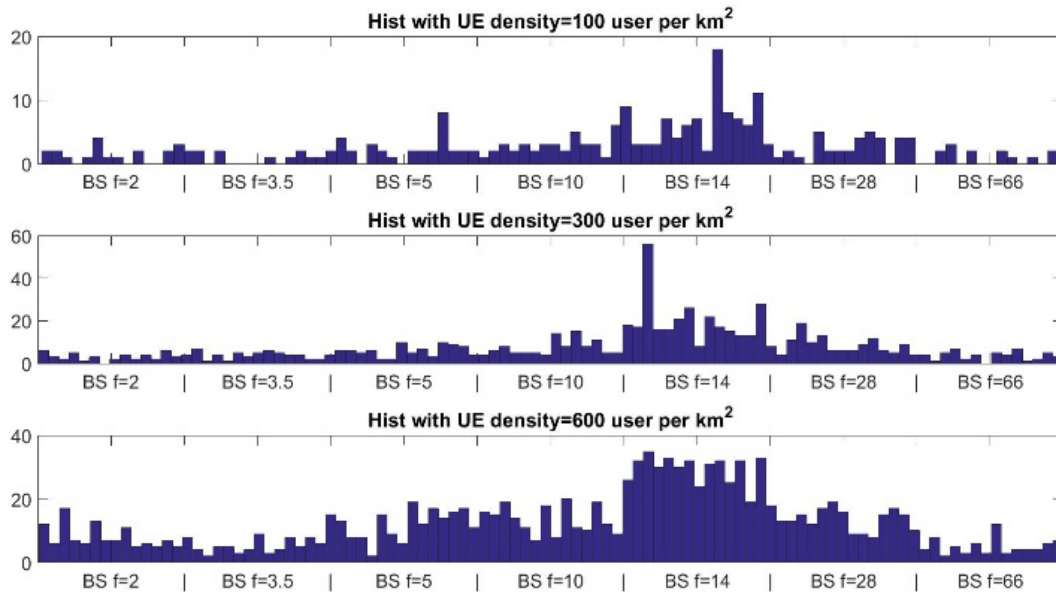


Figura 6-6. Distribución de Usuarios por tipo de BS para una potencia distribuida configuración: D

#### 6.4.1 Eficiencia energética

La reducción de energía consumida por las infraestructuras, será uno de los objetivos de las futuras red 5G. En la idea de reducir la energía consumida, un desarrollo prometedor es adoptar algoritmos de apagado encendido de las BS [101] [102] [103], así como reducir el consumo máximo de la BS cuando no trabaja a toda carga o cuando está en modo reposo. Sin embargo, las BS que operan en alta frecuencia usan un alto número de antenas y de canales de RF para poder hacer frente a las condiciones adversas del canal de propagación, y esto incrementa drásticamente la potencias consumida por estas BS. El ancho de banda disponible en alta frecuencia es muy alto, y las capacidades también lo son. Con esto, las Bs que trabajan en altas frecuencias tendrán un consumo energético alto, pero también suministrarán altas capacidades a los usuarios. Teniendo en cuenta estos factores, una nueva métrica se ha propuesto recientemente [98], que se la capacidad total e la red dividida por la potencia consumida total, medido en (bps/w), de tal forma que diferentes configuraciones se pueden comparar en los conceptos de capacidad y energía.

En este documento se asume que la potencia consumida por una BS cuando está encendida es de 750 mW, y cuando la BS está apagada la potencia consumida es un 15% de los 750 mW. En las simulaciones realizadas, se considera que todas las BS que no tiene usuarios conectados están apagadas. Se evalúan todos los escenarios excepto el escenario A.

En la figura 6.7 se presenta la eficiencia en (bps/W) con respecto al número de BS desplegadas en la red. Las líneas de cada color identifican diferentes densidades de UE. Los diferentes mismos escenarios se presentan en el mismo color. La conclusión que se obtiene de la gráfica es que la eficiencia no varía en función del escenario simulado. La causa de ello es que el número de BS que están apagadas es muy bajo,

y por ello la potencia consumida ahorrada es mínima con respecto a la potencia consumida por toda la red.

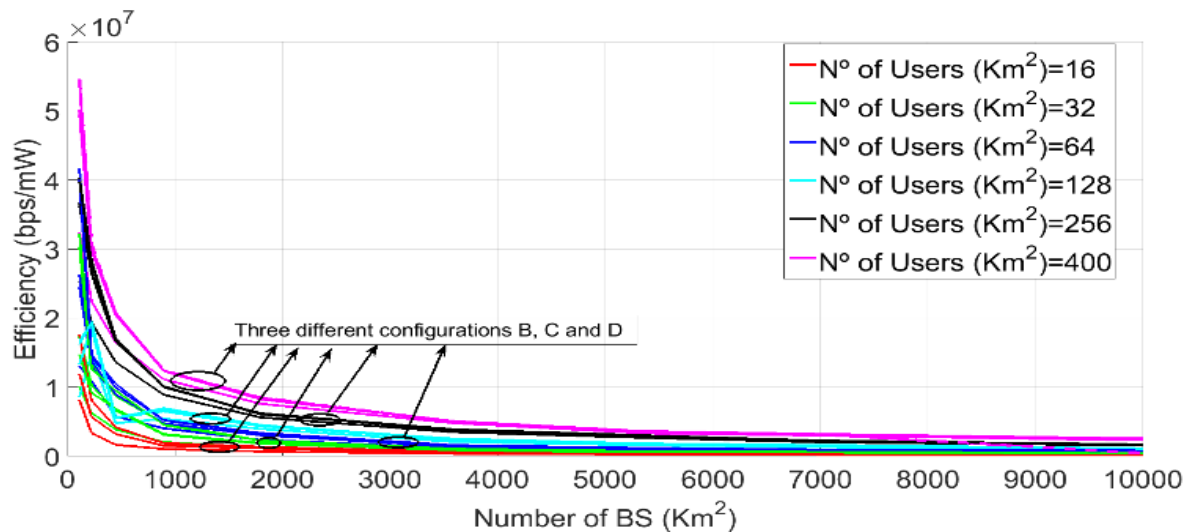


Figura 6-7. Gráfica de eficiencia con respecto a número de BS

La figura 6.8 muestra la eficiencia (bps/W) con respecto a la densidad de UE. Se presenta en diferentes líneas para diferentes números de BS. Las mismas configuraciones se presentan en líneas de mismo color. Es decir, cada simulación de un mismo escenario usa un mismo color de línea, y tiene una forma similar para cada escenario. En la figura se muestra que, al aumentar el número de UE, aumenta la eficiencia. También se observa que, al aumentar el número de usuarios, aumenta el número de BS, y se limita el número de BS que se pueden desconectar. No obstante, cuando el número de usuarios aumenta hasta un valor que produce que un usuario se asigne a más de una BS, esto hace que se divida el ancho de banda entre ellas, y la eficiencia cae drásticamente con la consiguiente reducción de la capacidad.

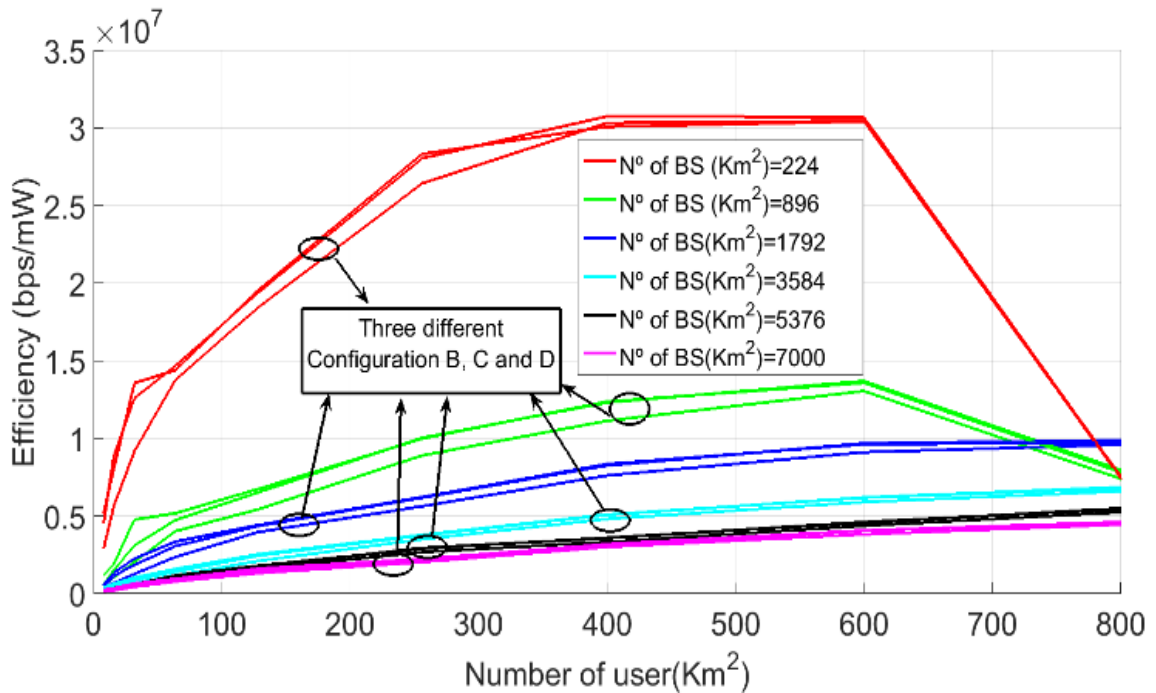


Figura 6-8. Gráfica de eficiencia con respecto al número de usuarios

Se ha implementado en este trabajo un modelo de redes 5G que contiene diferentes tipos de BS en función de su frecuencia de trabajo. Se ha analizado diferentes configuraciones de potencia, diferentes densidades de UE y de BS. Se ha analizado el número de UE conectados por BS, y se ha obtenido que la potencia transmitida depende en gran medida del tipo de BS. Con el fin de lograr una optimización de los recursos y de la carga, será necesario un estudio personalizado de la potencia emitida por cada BS. En resumen, en este documento se han analizado diferentes sistemas para obtener la eficiencia en valor de (bps/W). se ha comprobado en los resultados, que esta medida es altamente dependiente del número de BS apagadas. También se ha comprobado que el número de BS debe ser lo suficientemente grande para permitir que solo unos pocos usuarios se conecten a cada BS, ya que, de otra forma, la capacidad se degrada drásticamente. El trabajo futuro se centrará en la introducción de un modelo energético más refinado y en el tratamiento individual de la potencia transmitida.

### 6.5 Optimización del apagado de celdas (problema CSO).

El problema de la optimización del CSO se ha estudiado desde diferentes formas [102] Una de ellas es mediante el uso de algoritmos de optimización. En la mayoría de trabajos se pretende maximizar o minimizar, según el caso, varios objetivos a la vez. Esto es muy usado en muchos métodos estocásticos, así como el uso de algoritmos Evolutivos. Los algoritmos Evolutivos se pueden clasificar en: Algoritmos Genéticos, Programación Genética, Programación Evolutiva, y Estrategias Evolutivas. Los algoritmos evolutivos trabajan sobre un conjunto de

potenciales soluciones a las que someten a operaciones estocásticas para encontrar la mejor solución.

En este apartado se usarán el algoritmo Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II, (NSGA-II). El NSGA-II es un algoritmo que se basa en generar una nueva población desde la población inicial. La nueva población y la antigua, se clasifican según su rango, y se elige la mejor solución para crear una nueva población. Además, se implementará un pequeño operador que hará que las búsquedas funcionen mucho mejor. Este operador simplemente apagará las celdas que no tengan ningún usuario conectado y cuando un usuario se mueva a otra estación base encenderá las estaciones base vecinas, este operador se denominará operador ACR.

Se escogerá la configuración con un mayor número de usuarios y un mayor número de estaciones base. Se representa de manera tridimensional en la figura 6.9 y su proyección en 2D en la figura 6.10. Los resultados obtenidos muestran claramente como un algoritmo con el operador diseñado se comporta mejor que el algoritmo sin ningún operador. Es decir, el algoritmo con el operador obtiene más capacidad y menos potencia consumida en el mismo tiempo de cálculo.

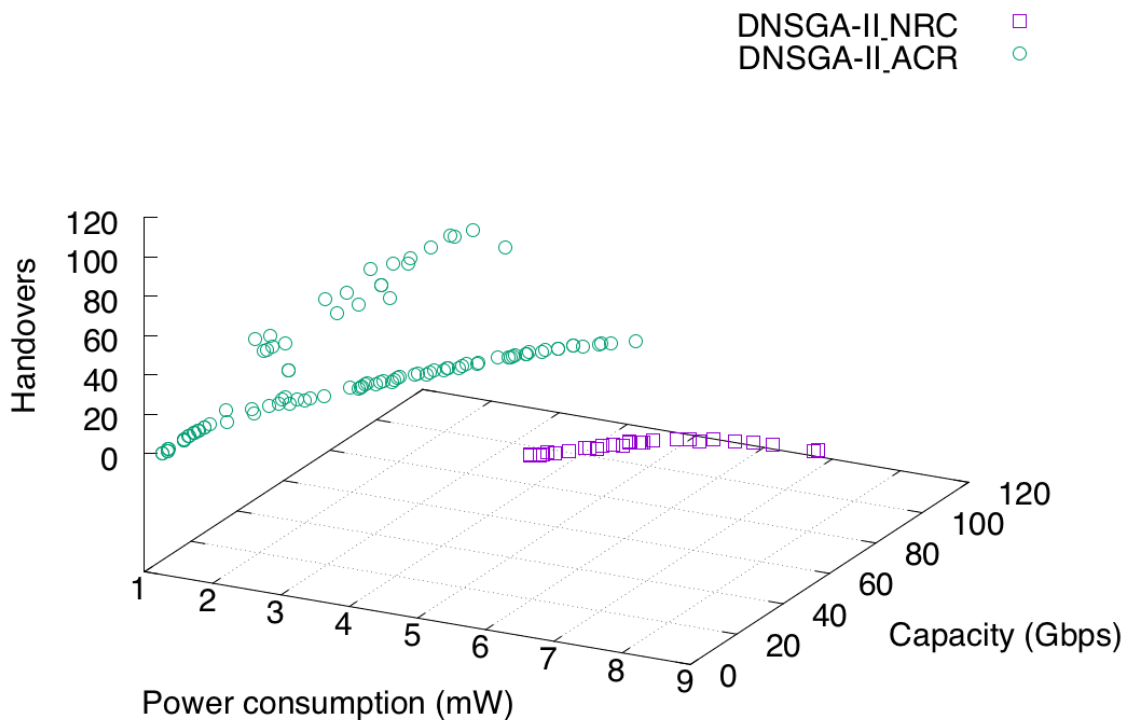


Figura 6-9. Gráfica en 3D, de la potencia y la capacidad en función de los handovers.

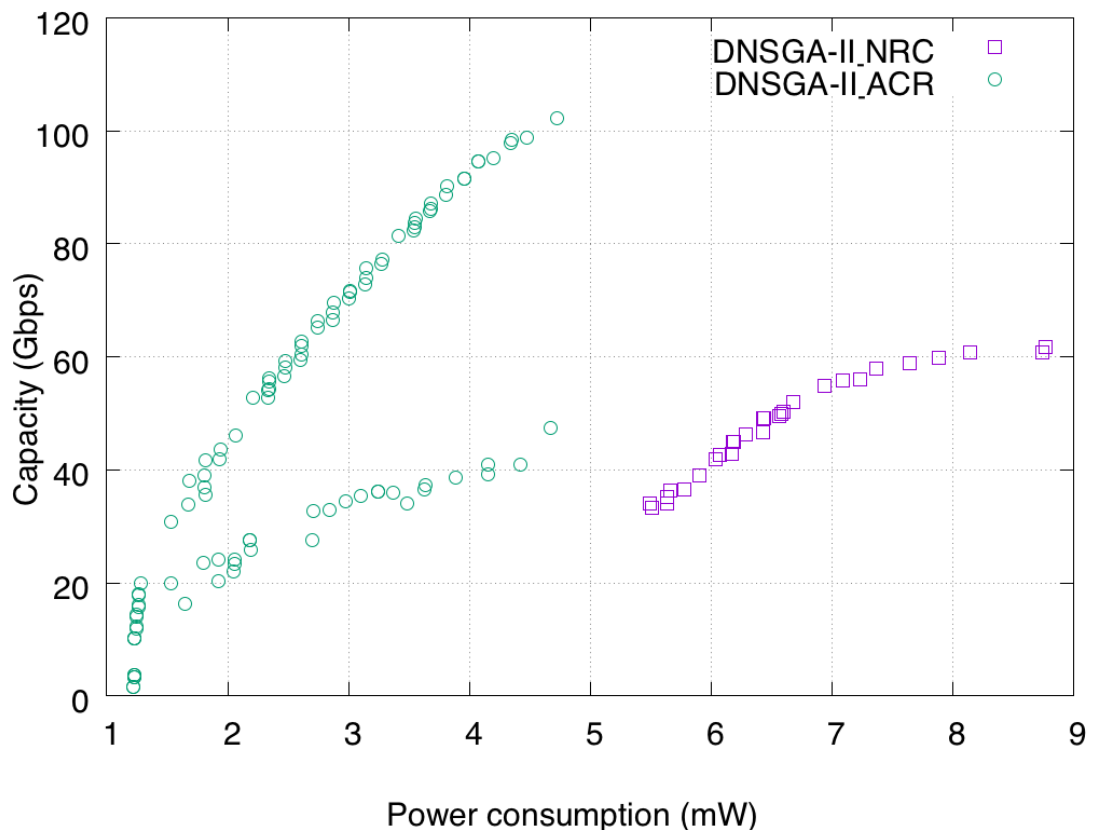


Figura 6-10. Gráfica de la capacidad en función de la potencia consumida.

## 6.6 Conclusiones

Se ha desarrollado un modelo de redes heterogéneas ultradensas en el cual se ha incluido todos los desarrollos realizados en los capítulos anteriores del canal de propagación. Se ha realizado un modelado experimental del consumo energético para una red en función de la potencia transmitida. En este modelado se ha demostrado que la distribución de carga de las distintas estaciones base en una red heterogénea es altamente dependiente de la potencia transmitida por la estación base. También se demuestra que la eficiencia energética es enormemente dependiente del número de estaciones base y del número de usuarios. Finalmente se utilizan dos algoritmos específicos de optimización para una configuración determinada y se demuestra que algunos operadores de búsqueda especifican pueden mejorar las prestaciones de la red en un gran porcentaje.

## 7. Conclusiones y líneas futuras.

### 7.1 Conclusiones.

En esta tesis se han presentado diferentes avances respecto al estado de la técnica basándose en simulaciones y medidas que se han aplicado de manera conjunta. El principal objetivo ha sido profundizar más en el conocimiento del canal de propagación, que se ha aplicado a la obtención de modelos más reales de redes 5G. Estos modelos nos han permitido avanzar en el cómputo de capacidad y consumo energético en dichas redes de última generación. A continuación, se detallan las diferentes contribuciones del trabajo, organizadas en tres grandes bloques: avances en sistemas MIMO Masivos Distribuidos, avances en los sistemas MIMO Masivos Distribuidos de alta frecuencia y avances en eficiencia energética.

#### 7.1.1 Avances en sistemas MIMO Masivos Distribuidos

- En primer lugar, se ha cuantificado la influencia del canal de propagación en el cálculo de la capacidad del enlace de comunicaciones. Analizando el estado de la técnica actual en el canal de propagación.
- Se ha desarrollado un método para emular entornos MIMO Distribuidos partiendo de varios entornos independientes con el receptor común. Se han comparado sistemas MIMO y MIMO Distribuidos.
- Se ha propuesto la correlación como primera métrica de bondad de los sistemas MIMO Distribuidos. Se ha demostrado que el grado de decorrelación implícito en los sistemas DMIMO hace que la correlación no sea uno de los parámetros más importantes a tener en cuenta en los sistemas MIMO Distribuidos.
- Se ha realizado un análisis sistemático de sistemas DMIMO aumentando el número de antenas hasta llegar a sistemas MIMO Distribuidos Masivos. Se ha incluido en el análisis el valor medio de correlación y se ha variado el número de estaciones base que forman el sistema Distribuido. Se ha concluido que es más importante aumentar el número de estaciones base que decorrelar la señal dentro de las antenas de la estación base. De la misma forma, se ha constatado que cuando mayor es el número de antenas, menor es la influencia de la correlación, verificando que cuando el número de estaciones base es mayor que 3 la influencia de la correlación en la capacidad es del orden de 1 (bits/sg/Hz). Se ha observado que existen otros factores que condicionan la capacidad el enlace.

- Se ha implementado un sistema que varía la potencia procedente de cada una de las estaciones base. Los resultados obtenidos en los diferentes análisis realizados han demostrado que, cuanto más balanceado o igualadas estén las potencias recibidas, mayor es la capacidad del sistema. Por tanto, se ha propuesto como métrica de la bondad de los sistemas la varianza de potencia recibida de las diferentes BS. Esto es, la capacidad aumenta cuando la varianza baja. Las variaciones de capacidad debidas al valor de la varianza de potencia no son muy grandes unos 2 (bits/sg/Hz).
- Se ha constatado que la influencia de la correlación mantiene su influencia cuando existe un desbalanceo de potencia, pero varía mucho en función si la señal correlada proviene de una estación con más o menos potencia.

### 7.1.2 Avances en los sistemas MIMO Masivos Distribuidos en alta frecuencia

- Se ha realizado un análisis de los sistemas a tres frecuencias 28, 40 y 78 GHz, analizando tres de los escenarios de propagación propuestos por 3GPP (RMa, UMa y UMi). También se ha trabajado con visión directa (LOS) y con visión no directa (NLOS).
- Partiendo de emulaciones individuales de estaciones base, se han formado distintos sistemas DMIMO analizando de forma análoga a los sistemas de baja frecuencia la correlación y el desbalanceo de potencia en los diferentes sistemas. Las diferencias de capacidad se mantienen en los mismos ordenes de magnitud entre los sistemas correlados y no correlados que para los sistemas de baja frecuencia (son del orden de 2 bit/sg/Hz). Hay que incidir que, aunque las variaciones de la eficiencia espectral son las mismas, las consecuencias no son las mismas porque el ancho de banda disponible puede ser varios ordenes de magnitud superior en altas frecuencias. Esto es, a baja frecuencia (2 GHz), un canal puede tener 50 MHz de ancho de banda, lo que implica 100 Mbit/s de influencia de la correlación. Sin embargo, en alta frecuencia (78 GHz) los canales pueden ser de 1 GHz implicando esto diferencia de velocidades de hasta 2 Gbit/s.
- Se han analizado los sistemas DM-MIMO, constatando que, al pasar de LOS a NLOS en las dos frecuencias, la capacidad media disminuye en media unos 20 bit/sg/Hz. En el análisis en el escenario RMa, los valores de capacidad en visión LOS son un poco mayores que en visión NLOS, y tiene unos valores de capacidad alrededor de 150 Bits/sg/Hz para las 3 frecuencias analizadas. En visión NLOS, para el escenario UMa las capacidades disminuyen mucho tanto a la frecuencia de 10 GHz como a 28 GHz, tanto que están por debajo de 10 Bits/sg/Hz. En el escenario UMi los valores de capacidad para los casos de visibilidad LOS en las 3 frecuencias son muy parecidos a los valores obtenidos para el escenario UMa, anterior.



Para los escenarios UMa y UMi, en visibilidad NLOS, la capacidad disminuye mucho, especialmente en el escenario UMa.

- Se ha constatado que la distancia no tiene una gran influencia en las capacidades, esto es, que el entorno no varía significativamente con la distancia si no que lo que condiciona la capacidad es la SINR que lógicamente depende de la potencia recibida y ésta a su vez de la distancia.
- Se ha constado, como era previsible, que los escenarios RMa tienen menor capacidad que los escenarios UMa y UMi al estar más correlada la señal. Por tanto, la capacidad es mucho más alta en los escenarios urbanos que en el escenario rural.

### 7.1.3 Avances en la eficiencia energética

- Se ha desarrollado un modelo de redes heterogéneas ultradensas en el cual se han incluido todos los desarrollos realizados en los capítulos anteriores del canal de propagación.
- Se ha realizado un modelado experimental del consumo energético para una red en función de la potencia transmitida. En este modelado se ha demostrado que la distribución de carga de las distintas estaciones base en una red heterogénea es altamente dependiente de la potencia transmitida por la estación base.
- Se ha demostrado que la eficiencia energética es enormemente dependiente del número de estaciones base y del número de usuarios.
- Se han utilizado dos algoritmos específicos de optimización para una configuración determinada y se demuestra que algunos operadores de búsqueda específica pueden mejorar las prestaciones de la red en un gran porcentaje.

## 7.2 Líneas Futuras.

De la misma forma que en esta tesis se ha contribuido en tres ámbitos diferentes de los sistemas 5G, también los estudios realizados han abierto la puerta al desarrollo de nuevos avances en distintos aspectos de estos sistemas, e incluso en el desarrollo de las siguientes generaciones de comunicaciones móviles (en 6G, por ejemplo, está sobre la mesa el uso de canales de propagación por encima de los 100 GHz). De esta forma, las líneas futuras de esta tesis las podemos agrupar en los siguientes ítems: desarrollo de sistemas de medida del canal de propagación, desarrollo de técnicas de emulación del canal de propagación e investigación en algoritmos que reduzcan el consumo energético.

### 7.2.1 Líneas futuras relacionadas con los sistemas de medidas del campo de propagación.

Se abre el campo a la reconfigurabilidad de los sistemas de medida para dotar de capacidad de medida de diferentes entornos de propagación en un laboratorio. Para ello es necesario investigar en:

- Caracterización de los distintos entornos de propagación en términos estadísticos. Emulación de esos entornos de propagación mediante la introducción en las cámaras de medida de diferentes elementos tales como absorbentes o sistemas reflectores en función de que se quiera enriquecer o no el entorno de propagación.
- Caracterización de los distintos entornos de propagación en términos de parámetros físicos como ángulo de llegada, ángulo de salida, perfil de retardo. Configuración de la cámara de medida para obtener esos parámetros físicos, introducción de elementos hardware reconfigurables como líneas de retardo para poder alcanzar esos parámetros.
- Mejora del emulador de canal de propagación introduciendo sistemas conversores de RF a fibra óptica para poder aumentar las distancias y posibilidades del sistema de emulación.

### 7.2.2 Líneas futuras relacionadas con la emulación del campo de propagación.

Para aumentar la reconfigurabilidad de los sistemas de medida, una vez realizada la medida se abren diferentes posibilidades para, partiendo de las medidas tomadas en el laboratorio, obtener un número mayor de entornos y con diferentes características de las medidas. Para ello es necesario investigar en:

- Aplicación de técnicas avanzadas de procesamiento de señal como por ejemplo el “Time gating” que consiste en inventanar la señal y solo quedarse con parte de ella en función del perfil de retardo. Es decir, viendo el perfil de retardo se puede ver en que tiempo llegan cada una de las reflexiones de la señal. Así, con las técnicas adecuadas, se pueden quitar ciertas reflexiones o el rayo directo con lo que podemos reconfigurar el entorno. De la misma forma, con las técnicas de procesamiento de señal adecuadas se puede desplazar en el tiempo parte de la señal recibida emulando entornos que reciban la señal en distinta temporalidad (y consecuencia distancia).
- Aplicación de técnicas algorítmicas de optimización para seleccionar parte de la señal recibida. Es decir, si mediante hardware no se ha podido conseguir los parámetros estadísticos o físicos buscados para un determinado entorno se pueden seleccionar ciertas componentes y descartar otras para buscar la emulación de un entorno determinado.

### 7.2.3 Líneas futuras relacionadas con el consumo energético.

Se ha demostrado que la adecuada modelización del campo de propagación proporciona resultados muchos más precisos a la hora de reducir el consumo energético. A la hora de continuar esta línea de investigación se hace necesario colaborar estrechamente con investigadores con un alto conocimiento de algoritmia y optimización.

- Desarrollo de operadores específicos de búsqueda, para ello es imprescindible un conocimiento del problema, es decir, un conocimiento del modelado de las estaciones base y de los sistemas 5G. Estos operadores de búsqueda se implementan dentro de algoritmos metaheurísticos de optimización por lo que el conocimiento de este campo es igual de imprescindible para el desarrollo de operadores.
- Estudio de la efectividad de las optimizaciones en función del algoritmo de optimización utilizado. Implementación de algoritmos de optimización dinámica en función de los cambios del sistema (movilidad de usuarios, cambios en la demanda de datos, etc.).

### 7.3 Resultados obtenidos por el autor

#### 7.3.1 Publicaciones en revistas internacionales con JCR

1. Santiago González Auriolés; Jose Luis Padilla; Pablo Padilla; Juan Francisco Valenzuela Valdés; **Juan Carlos González Macías**. “*On the MIMO Capacity for Distributed System under Composite Rayleigh/Rician Fading and Shadowing*”,. International Journal of Antennas and Propagation. 2015 - 105017, pp. 1 - 12. Factor de impacto en 2015: 0.75. Q3 en JCR 60/82.
2. F. Luna-Valero, Pablo Zapata-Cano , **J.C. González-Macías** and Juan Valenzuela-Valdés “*Approaching the cell switch-off problem in 5G ultra-dense networks with dynamic multi-objective optimization*”. Future Generation Computer Systems. Accepted Factor de impacto en 2018: 5.76. Q1 (D1 es decir está en el primer decil) en JCR 8/104.
3. M.T. Elkhorrassani, A. Palomares-Caballero, A. Alex-Amor, **J.C. González-Macías**, A. Valenzuela-Valdés and Pablo Padilla “*Near field pattern uniformity for high resolution Magnetic Resonance Imaging (MRI) systems based on metaheuristic optimization*”. The International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering. “Minor Revisions” Factor de impacto en 2018: 1.42. Q3 en JCR 180/265
4. **J.C. González-Macías**, F. Luna-Valero, Pablo Padilla and Juan Valenzuela-Valdés “*On the Distributed Massive MIMO propagation channel*”. IEEE Access. Under revision.

#### 7.3.2 Publicaciones en congresos

1. Juan Francisco Valenzuela Valdes; Ángel Palomares; Juan Carlos Gonzalez Macías; Antonio Valenzuela Valdés; Pablo Padilla Valdés; Francisco Luna Valero. “*On the Ultra-Dense Small Cell Deployment for 5G Networks*” 2018 IEEE 5G World Forum Program. Santa Clara, California, Estados Unidos de América. Julio 2018.
2. Juan Carlos González Macías; Juan Francisco Valenzuela Valdés; Pablo Padilla de la Torre; Javier Carmona Murillo. “*Study of Correlation and Power Imbalance on the MIMO Distributed System*” EUCAP 2017. Paris, Francia. Entidad organizadora: EURAAP.
3. Javier Carmona Murillo; Juan Francisco Valenzuela Valdes; Pablo Padilla de la Torre; Juan Carlos Gonzalez Macías; Francisco Javier Rodríguez Pérez; Francisco Juna Valero “*Análisis del canal de comunicación inalámbrico y su impacto en los mecanismos de gestión de la movilidad*”. Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio. URSI 2018. Granada, Andalucía, España. Septiembre 2018.

4. Juan Carlos Gonzalez Macías; Antonio Valenzuela Valdes; Juan Francisco Valenzuela Valdes; Javier Carmona Murillo; Pablo Padilla de la Torre. *"Estudio de la influencia de la correlación y el desbalanceo de potencia en Sistemas MIMO Distribuidos"*. Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio. URSI 2018. Granada, Andalucía, España. Septiembre 2018.
5. Juan Carlos González Macías; Juan Francisco Valenzuela Valdés; Pablo Padilla de la Torre. *"Estudio de la influencia de la correlación y el desbalanceo de potencia en Sistemas MIMO Distribuidos."* Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio. URSI Cartagena 2017.
6. Juan Francisco Valenzuela Valdés; Pablo Padilla de la Torre; Rafael Luque Baena; Francisco Juna Valero; Juan Carlos González Macías. *"Optimizando el gasto de energía en redes de sensores con la utilización del conformado de haz"*. X Congreso Español de Metaheurísticas, Algoritmos Evolutivos y Bioinspirados. MAEB 2015. Centro Universitario de Mérida, Universidad de Extremadura. MÉRIDA, Extremadura, España. Febrero 2015

### 7.3.3 Otras publicaciones

#### 7.3.3.1 Publicaciones en revistas internacionales con JCR en docencia

1. Javier Carmona Murillo; Miguel A. Martín Tardío; Juan Arias Masa; **Juan C. González Macías**; Pedro J. Pardo Fernández; Juan F. Valenzuela Valdés. *"Providing professional skills to telecommunication engineers through a novel vertical approach"*. International Journal of Engineering Education. 30 - 6B, pp. 1645 - 1656. Factor de impacto en 2015: 0.55. Q3 en JCR 61/85

#### 7.3.3.2 Publicaciones en congresos en docencia

1. Javier Carmona Murillo; Juan Carlos González Macías; Miguel Ángel Martín Tardío; Pedro José Pardo Fernández; Juan Arias Masa; Juan Francisco Valenzuela Valdés. *"Problem-based learning for skills development in advanced communications"*. 8th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI 2013). Lisboa, Portugal. Junio 2013.
2. Juan Arias Masa; Juan Francisco Valenzuela Valdés; Javier Carmona Murillo; Juan Carlos González Macías; Miguel Ángel Martín Tardío; Pedro José Pardo Fernández. *"Project-based learning for Error Handling in IPv4 Packets"*. 8th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI 2013). Lisboa, Portugal. Junio 2013.
3. Juan Francisco Valenzuela Valdés; Juan Arias Masa; Javier Carmona Murillo; Juan Carlos González Macías; Miguel Ángel Martín Tardío; Pedro José Pardo Fernández. *"Teaching innovation project on Information and*

*Communications Technology*" 8th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI 2013). Lisboa, Portugal. Junio 2013.

4. Juan Carlos González Macías; Miguel Ángel Martín Tardío; Pedro Pardo Fernández; Juan Francisco Valenzuela Valdés; Juan Arias Masa; Javier Carmona Murillo. "*Proyecto de innovación docente en normalización y proyectos de telecomunicación*". pp. 361 - 366. Educación Editora, 01/06/2014. ISBN 978-84-15524-14-4
5. Pedro Pardo Fernández; Juan Francisco Valenzuela Valdés; Juan Arias Masa; Javier Carmona Murillo; Juan Carlos González Macías; Miguel Ángel Martín Tardío. Título: "*Proyecto de innovación docente en comunicaciones inalámbricas*". pp. 289 - 294. Educación Editora, 01/06/2014. ISBN 978-84-15524-18-2
6. Pedro José Pardo Fernández; Juan Francisco Valenzuela Valdés; Juan Arias Masa; Javier Carmona Murillo; Juan Carlos González Macías; Miguel Ángel Martín Tardío. "*Gestión de errores en ipv4, PBL de aprendizaje cooperativo*". Jornadas universitarias de tecnología educativa. Centro transdisciplinar de investigación en educación. Valladolid, Castilla y León, España. Junio 2013.
7. Pedro José Pardo Fernández; Juan Francisco Valenzuela Valdés; Juan Arias Masa; Javier Carmona Murillo; Juan Carlos González Macías; Miguel Ángel Martín Tardío. "*Proyecto de innovación docente en comunicaciones inalámbricas*". III Congreso Internacional de Docencia Universitaria. Universidad de Vigo. Vigo, Galicia, España. Junio 2013.
8. Juan Carlos González Macías; Miguel Ángel Martín Tardío; Pedro Pardo Fernández; Juan Francisco Valenzuela Valdés; Juan Arias Masa; Javier Carmona Murillo. "*Proyecto de innovación docente en normalización y proyectos de telecomunicación*". III Congreso Internacional de Docencia Universitaria. Universidad de Vigo. Vigo, Galicia, España. Junio 2013.

## 8. Referencias Bibliográficas

- [1] G. Akhil y J. R. Kumar, «A Survey of 5G Network: Architecture and», *IEEE Access*, vol. 3, pp. 1206 - 1232, 2015.
- [2] B. S. Adeshina, H. K. M. Saidul, M. Shahid, D. Linglong y R. Jonathan, «"Millimeter-Wave Massive MIMO Communication for Future Wireless Systems: A Survey",» *IEEE Communications surveys & tutorials*, vol. 20, nº 2, pp. 836 - 869, 2018.
- [3] M. Xiao, S. Mumtaz, Y. Huang, L. Dai, Y. Li, M. Matthaiou, G. K. Karagiannidis, E. Björnson, K. Yang, C.-L. I y Amitabha, «Millimeter Wave Communications for Future Mobile Networks,» *IEEE Journal on selected areas in communications*, vol. 35, nº 9, pp. 1909 - 1935, 2017.
- [4] A. F. W. Peng, T. Obara, Y. T., M. R. y N. M., "Distributed antenna network for gigabit wireless access," *Int. J. Electron. Commun.*, vol. 66, no. 8, pp. 605–612., Aug. 2012.
- [5] R. Hoshyar, F. Hélot y T. R., "An accurate closed-form approximation of the distributed MIMO outage probability," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 10, no. 1, pp. 5–11., Jan. 2011.
- [6] J. Mietzner, R. Schober, L. Lampe, W. H. Gerstacker y P. A. Hoeher, «Multiple-Antenna Techniques for Wireless Communications – A Comprehensive Literature Survey,» *IEEE Communicationes surveys & tutorials*, vol. 11, nº 2, pp. 87 - 105, 2009.
- [7] C.-X. Wang, X. Hong, X. Ge, X. C. G. Zhang y J. Thompson, «Cooperative MIMO Channel Models: A Survey,» *IEEE Communications Magazine*, pp. 80 - 87, 2010.
- [8] K. M. Addali, A. BenMimoune, F. A. Khasawneh, A. M. Saied y M. Kadoch, «Railways, Dual-Backhaul Links in LTE-A Mobile Relay System For High-Speed,» de *International Conference on Future Internet of Things and Cloud Workshops*, 2016.
- [9] 3GPP, 38.901 y T. R. TR, «Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz,» [En línea]. Available: <http://www.3gpp.org/DynaReport/38901.htm>.
- [10] D. S. Baum, H. J. y S. J., «An interim channel model for beyond-3G systems: extending the 3GPP spatial channel model (SCM),» de *Proc. IEEE Veh. Technol. Conf. (VTC Spring)*, 2005.
- [11] Q. H. Abbasi, H. E. Sallabi, S. E, Q. K y Alomainy, «Condition number variability of ultra wideband MIMO on body channels,» in *2016 International Workshop on Antenna Technology (iWAT)*, p. pp. 167–169, 2016.
- [12] S. Sun, H. Yan y R. G. R. M. J. T. S, «Millimeter Wave Small-Scale Spatial Statistics in an Urban Microcell Scenario,» de *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2017.
- [13] J. G. R. MacCartney, R. TS, S. S y D. S, «Indoor office wideband millimeter-wave propagation measurements and channel models at 28 GHz and 73 GHz for ultra-dense 5G wireless networks,» *IEEE Access*, vol. 3, pp. 2388-2424, 2015.
- [14] O. Kanhere y T. S. Rappaport, «Position locationing for millimeter wave systems,» de *IEEE 2018 Global Communications Conference*, 2018.
- [15] S. Rangan, M. Mezzavilla, T. Rappaport, M. Polese, A. Zanella, A. Dhananjay, C. Kessler y M. Zorzi, «Public Safety Communications above 6 GHz: Challenges and Opportunities,» *IEEE Access*, vol. 6, pp. 316-329, 2018.
- [16] S. Ju y T. S. Rappaport, «Millimeter-wave Extended NYUSIM Channel Model for Spatial Consistency,» *IEEE 2018 Global Communications Conference*, pp. 1-6., 2018.
- [17] D2.1 y m. Deliverable, «mmMAGIC Deliverable D2.1,» marzo 2016. [En línea]. Available: <https://5g-mmmagic.eu/results/#deliverables>.
- [18] A. Bamba, F. Mani y R. d'Errico, «A comparison of indoor channel properties in V and E bands,» de *Antennas and Propagation (EUCAP), 2017 11th European Conference on*, paris, 2017.

- [19] Y. Zou, P. Zetterberg, U. Gustavsson, T. Svensson, A. Zaidi, T. Kadur, W. Rave y a. Gerhard, «Impact of Major RF Impairments on mm-wave Communications using OFDM Waveforms,» de *Globecom 2016*, 2016.
- [20] F. Schaich y T. Wild, «2014 6th International Symposium on Communications, Control and Signal Processing (ISCCSP),» Athens, Greece, 2014.
- [21] S. Kundrapu, S. I. Dutt, N. K. Koilada y A. C. Raavi, «Characteristic Analysis of OFDM, FBMC and UFMC Modulation Schemes for Next Generation Wireless Communication Network Systems,» de *2019 3rd International conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA)*, 2019.
- [22] Bellanger, D. Mattera, M. Tanda y Maurice, «On blind CFO estimation for FBMC-PAM systems,» *2019 IEEE 20th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC)*, 2019.
- [23] V. Vakilian, T. Wild, F. Schaich, S. Ten Brink y J.-F. Frigon, *Universal-Filtered Multi-Carrier Technique for Wireless Systems Beyond LTE*, Montréal: Polytechnique De Montréal, École, 2013.
- [24] I. Baig, U. Farooq, N. U. Hasan, M. Zghaibeh, A. Sajid y U. M. Rana, «A Low PAPR DHT Precoding Based UFMC Scheme for 5G Communication Systems,» *2019 6th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)*, 2019.
- [25] Yarrabothu, R. Sekhar, Nelakuditi y U. Rani, «Optimization of out-of-band emission using kaiser-bessel filter for UFMC in 5G cellular communications,» *IEEE*, vol. 16, nº 8, p. \*\*, 2019.
- [26] X. Zhang, M. Li, H. Hu, H. Wang, B. Zhou y X. You, «DFT Spread Generalized Multi-Carrier Scheme for Broadband Mobile Communications,» de *2006 IEEE 17th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, Helsinki, Finland, 2006.
- [27] P. Schniter, «On the design of non-(bi)orthogonal pulse-shaped FDM for doubly-dispersive channels,» de *2004 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, Montreal, Quebec., Canada, 2004.
- [28] H. Cheng-Yu, W. Jen-Ming, W. Chin-Liang, H. Su y W. Gang, «Waveform optimization of BFDm for massive connections support over dispersive channels,» de *2016 IEEE International Conference on Communication Systems (ICCS)*, 2016.
- [29] H. Adouni, M. Hizem y R. Bouallegue, «BFDm prototype for cognitive radio systems,» de *10th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM 2014)*, 2014.
- [30] A. D. Barrado, *Estudio y caracterización del canal y de la propagación en ondas milimétricas, orientadas a su utilización en redes de comunicaciones móviles 5G.*, Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2017.
- [31] Y. Niu, Y. Li, D. Jin, L. Su y A. V. Vasilakos, «A survey of millimeter wave communications (mmWave) for 5G: opportunities and challenges,» *Wireless Netw.* pp. 2657 - 2676, 2015.
- [32] T. Ramón y J. Millán, «Qué es ...5G [quinta generación de tecnologías de telefonía móvil],» *BIT*, nº 211, 2019.
- [33] H. M. Burel, *Tecnología 5G y formas de onda de acceso al medio*, 2018.
- [34] «MIOTI (Madrid internet of things institute),» 2019. [En línea]. Available: <https://www.mioti.es/es/>.
- [35] M. d. energía, t. y. a. digital and S. d. e. p. l. s. d. l. i. y. l. a. digital, «Plan Nacional 5G. 2018-2010,» 2018.
- [36] H. Tullberg, P. Popovski, D. Gozalvez-Serrano, P. Fertl, Z. Li, A. Höglund, M. A. Uusitalo, H. Droste, Ö. Bulakci, J. Eichinger y K. Pawlak, «METIS System Concept: The Shape of 5G to Come,» *IEEE Communications Magazine*, 2015.
- [37] W. Gerhard, J. Peter, K. Martin, W. Thorsten, S. Frank, C. Yejian, B. S. Ten, G. Ivan, M. Nicola, F. Andreas, M. Luciano, C. Nicolas, K. Dimitri, D. Marcin, P. Slawomir y E. Bertalan, «5GNOW: non-orthogonal, asynchronous waveforms for future mobile applications,» *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, nº 2, 2014.
- [38] «Enhanced Multicarrier Techniques for Professional Ad-Hoc and Cell-Based Communications,» cordis, [En línea]. Available: <https://cordis.europa.eu/project/rcn/104989/factsheet/en>.
- [39] «newcom,» Network of Excellence in Wireless Communications, [En línea]. Available: [https://newcom-project.eu/index.php?option=com\\_content&view=featured&Itemid=128](https://newcom-project.eu/index.php?option=com_content&view=featured&Itemid=128).



- [40] «5GCM,» international Workshop on 5G, Connectivity and Mobility, [En línea]. Available: <http://www.5gworkshop.org/>.
- [41] «mmMAGIC,» mm-Wave based Mobile Radio Access Network for 5G Integrated Communications, [En línea]. Available: <https://5g-mmmagic.eu/>.
- [42] CNMC, «Informe Económico Sectorial de las Telecomunicaciones y el Audiovisual,» 2017.
- [43] N. F. Jejdling, «Ericsson Mobility Report,» June 2018.
- [44] V. V. Ratnam y A. F. Molisch, «Continuous Analog Channel Estimation Aided Beamforming for Massive MIMO Systems,» *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2019.
- [45] 3GPP, «Study on 3D Channel Model for LTE,» 3GPP, 2015.
- [46] A. Kammoun, H. Khanfir, Z. Altman, M. Debbah y M. Kamoun, «Preliminary results on 3D channel modeling: From theory to standardization,» *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 32, n° 6, pp. 1219–1229,, 2014.
- [47] 3GPP, «Spatial Channel Model for Multiple Input Multiple Output (MIMO),» 3GPP, 2014.
- [48] A. Maltsev y e. all, «WP5: Propagation, antennas and multiantenna techniques—D5.1: Channel modeling and characterization,» *Millim.-Wave Evol. Backhaul Access (MiWEBA)*,, 2014.
- [49] V. Nurmela y e. al, «Deliverable D1.4: METIS channel models,» *Mobile Wireless Commun. Enablers Twenty-Twenty Inf. Soc. (METIS)*,, 2014.
- [50] M. Kim, J. I. Takada, Y. Chang, J. Shen y Y. Oda, «Large scale characteristics of urban cellular wideband channels at 11 GHz,» de *Proc. 9th Eur. Conf. Antennas Propag. (EuCAP)*, 2015.
- [51] B. Ai, G. Ke, H. Ruisi, L. Jianzhi, L. Guangkai, D. H. Z. Zhong y H. K. M. a. Saidul, «On Indoor Millimeter Wave Massive MIMO Channels: Measurement and Simulation,» *IEEE Journal on selected areas in communications*, vol. 35, n° 7, pp. 1678-1690, 2017.
- [52] T. S. Rappaport, S. S. R. Mayzus, H. Zhao, Y. Azar y K. Wang, «Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: It will work,» *IEEE Access*, pp. vol. 1, pp. 335–349, 2013.
- [53] G. R. MacCartney, M. K. Samimi y T. T. S. Rappaport, «Omnidirectional path loss models in New York City at 28 GHz and 73 GHz,» *Proc. IEEE Int. Symp. Pers., Indoor Mobile Radio Commun. (PIMRC)*,, p. 227–231, 2014.
- [54] S. Deng, M. K. Samimi y T. S. Rappaport, «28 GHz and 73 GHz millimeter-wave indoor propagation measurements and path loss models,» de *Proc. IEEE Int. Conf. Commun. Workshop (ICCW)*, 2015.
- [55] M.-D. Kim, J. Liang, H.-K. Kwon y J. Lee, «Path loss measurement at indoor commercial areas using 28 GHz channel sounding system,» de *Proc. 17th Int. Conf. Adv. Commun. Technol. (ICACT)*, 2015.
- [56] S. Hur y e. al, «Wideband spatial channel model in an urban cellular environments at 28 GHz,» de *Proc. 9th Eur. Conf. Antennas*, 2015.
- [57] S. Hur y e. al, «Proposal on millimeter-wave channel modeling for 5G cellular system,» *IEEE J. Sel. Topics Signal Process*, vol. 10, n° 3, p. 454–469, 2016.
- [58] T. S. Rappaport, F. Gutierrez, J. E. Ben-Dor, J. N. Murdock, Y. Qiao y J. I. Tamir, «Broadband millimeter-wave propagation measurements and models using adaptive-beam antennas for outdoor urban cellular communications,» *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 61, n° 4, p. 1850–1859, 2013.
- [59] H. J. Thomas, R. S. Cole y G. L. Siqueira, «An experimental study of the propagation of 55 GHz millimeter waves in an urban mobile radio environment,» *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 43, n° 1, p. 140–146, 1994.
- [60] M. Kyro y e. al, «Measurement based path loss and delay spread modeling in hospital environments at 60 GHz,» *IEEE Trans. Wireless*, vol. vol. 10, n° no. 8,, p. pp. 2423–2427, 2011.
- [61] R. J. Weiler, M. Peter, T. Kühne, M. Wisotzki y W. Keusgen, «Simultaneous millimeter-wave multi-band channel sounding in an urban access scenario,» de *Proc. 9th Eur. Conf. Antennas Propag. (EuCAP)*, 2015.
- [62] S. Nie, G. R. MacCartney, S. Sun y T. S. Rappaport, «72 GHz millimeter wave indoor measurements for wireless and backhaul communications,» de *Proc. IEEE 24th Int. Symp. Pers., Indoor, Mobile Radio Commun. (PIMRC)*,, 2013.
- [63] T. S. Rappaport y G. R. MacCartney, «73 GHz millimeter wave propagation measurements for outdoor urban mobile and backhaul communications in New York City,» de *in Proc. IEEE Int. Conf.*, 2014.

- [64] A. Roivainen, C. F. Dias, N. Tervo, V. Hovinen, M. Sonkki y M. Latva-Aho, «Geometry-based stochastic channel model for twostory lobby environment at 10 GHz,» *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 64, n° 9, p. 3990–4003, 2016.
- [65] J. Huang, C.-X. Wang, R. Feng, J. Sun, W. Zhang y Y. Yang, «Multi-frequency mmWave massive MIMO channel measurements and characterization for 5G wireless communication systems,» *IEEE J. Sel.*, vol. 35, n° 7, p. 1591–1605, 2017.
- [66] G. R. M. Jr y T. S. Rappaport, «Millimeter-Wave Base Station Diversity for 5G Coordinated Multipoint (CoMP) Applications,» *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2019.
- [67] «TU Wien,» [En línea]. Available: <https://www.tuwien.at/en/>.
- [68] «RECOM Wireless InSite,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.remcom.com/wireless-insite-em-propagation-software/>.
- [69] NYU, «NYU WIRELESS,» [En línea]. Available: <https://wireless.engineering.nyu.edu/>.
- [70] D. He, B. Ai, K. Guan, p. He, B. Ai, K. Guan y T. Kürner, «The Design and Applications of High-Performance Ray-Tracing Simulation Platform for 5G and Beyond Wireless Communications: A Tutorial,» *IEEE Communications surveys & tutorials*, vol. 21, n° 1, pp. 10 - 27, 2019.
- [71] «Altair WinProp.,» 2018. [En línea]. Available: <https://altairhyperworks.com/product/FEKO/WinProp-Propagation-Modeling>.
- [72] «Ranplan Professional,» 2018. [En línea]. Available: <https://ranplanwireless.com/>.
- [73] «EDX Advanced Propagation,» 2018. [En línea]. Available: <http://edx.com/products/advanced-propagation-module/>.
- [74] «SIRADEL Volcano,» [En línea]. Available: <https://www.siradel.com/software/connectivity/volcano-software/>.
- [75] «Forsk CrossWave,» 2018. [En línea]. Available: <http://www.forsk.com/crosswave-propagation-model>.
- [76] M. Boban, J. Barros y O. K. Tonguz, «Geometry-based vehicle-to-vehicle channel modeling for large-scale simulation,» *IEEE Trans. Veh.*, vol. 63, n° 9, pp. 4146–4164, 2014.
- [77] «CloudRT,» 2018. [En línea]. Available: <http://www.raytracer.cloud/>.
- [78] P. R. Fernández, *Optimización de la gestión de recursos de radio en redes 5G*, Cantabria: Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación, Univesidad de Cantabria, 2017.
- [79] G. Foschini y M. Gans, «On Limits of Wireless Communications in a Fading Environment when Using Multiple Antennas,» *Wireless Personal Communications*, vol. 6, n° 3, p. 311–335, Mar. 1998..
- [80] P. S. Kildal y K. Rosengren, «Correlation and capacity of MIMO systems and mutual coupling, radiation efficiency, and diversity gain of their antennas: Simulations and measurement in a reverberation chamber,» *IEEE Commun Mag*, vol. 42, n° 12, pp. 104-112, Dec 2004.
- [81] J. F. Valenzuela-Valdés, M. A. Garcia-Fernández, A. M. Martínez-González y D. Sánchez-Hernández, «Evaluation of true polarization diversity for MIMO systems,» *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 57, n° 9, pp. 2746–2755, Sep. 2009..
- [82] H. J. Liebe, G. A. Hufford y M. G. Cotton, «Propagation modeling of moist air and suspended water/ice particles at frequencies below 1000 GHz,» *AGARD Conference Proceedings 542, 1993*, 1993.
- [83] J. J. A. Lempianen, J. K. Laiho-Steffens y A. F. Wacker, «Experimental results of cross polarization discrimination and signal correlation values for a polarization diversity scheme,» vol. 3, p. 1498–1502, 1997.
- [84] H. I. Xiao, S. Nie y O. Z. ping, «The cross polarization discrimination of MIMO antennas at mobile station,» vol. 203–206, 2008.
- [85] T. S. Rappaport and S. Deng, «“73 GHz wideband millimeter-wave foliage and ground reflection measurements and models,» in *2015 IEEE, International Conference on CommunicationWorkshop (ICCW)*, p. 1238–1243, 2015.
- [86] N. Bourbaki, *Elements of Mathematics, Algebra I.*, Hermann, 1974.
- [87] M. Matthaiou, D. I. Laurenson y C. X. Wang, «Reduced complexity detection for ricean MIMO channels based on condition number thresholding,» in *2008 International Wireless Communications and Mobile Computing Conference*, p. 988–993, 2008.
- [88] S. Sun, T. S. Rappaport, R. W. Heath, A. Nix y S. Rangan, «MIMO for millimeter-wave wireless communications: Beamforming, spatial multiplexing, or both?,» n° vol. 52, no.12, pp. 110–121, 2014.

- [89] T. S. J. Rappaport, R. W. Heath, R. C. Daniels y J. N. Murdock, *MillimeterWaveWireless Communications*, Pearson/Prentice Hall 2015, 2015.
- [90] J. Deissner y G. Fettweis., «A study on hierarchical cellular structures with inter-layer reuse in an enhanced GSM radio network,» 2003, pp. pages 243- 251.
- [91] X. Ge, S. Tu, G. Mao, C. X. Wang y T. Han, «5G Ultra-Dense Cellular Networks,» *IEEE Wireless Communications*, vol. 23, n° 1, pp. 72-79, 2016.
- [92] P. Gandotra, R. K. Jha y S. Jain, «Green Communication in Next Generation Cellular Networks: A Survey.,» *IEEE Access*, vol. 5, pp. 11727-11758, 2017.
- [93] T. Beitelmal, S. S. Szyszkowicz, G. D. Gonzalez y H. Yanikomeroglu, «Sector and site switch-off regular patterns for energy saving in cellular networks.,» *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 17, n° 5, pp. 2932-2945, 2018.
- [94] F. R. Arvaje y B. S. Ghahfarokhi, «Userre-associationandresource/powerre-allocationofcell switched-offUserEquipmentsingreencellularnetworks,» *ElsevierB.V*, vol. 37, 2019.
- [95] A. KumarRangiseti y B. ReddyTammaab, «Interference and QoS aware cell switch-off strategy for software defined LTE HetNets,» *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 125, n° 1, pp. 115-129, 2019.
- [96] T. S. Rappaport, S. Sun y M. Shafi, «Investigation and comparison of 3GPP and NYUSIM channel models for 5G wireless communications,» *IEEE 86th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*, pp. 1-5, 2017.
- [97] J. F. Valenzuela-Valdés, Á. Palomares, J. C. González-Macías, A. Valenzuela-Valdés, P. Padilla y F. Luna-Valero, «On the Ultra-Dense Small Cell Deployment for 5G Networks,» de *2018 IEEE 5G World Forum (5GWF)*, Silicon Valley, CA, USA, 2018.
- [98] D. Lopez-Perez, M. Ding, H. Claussen y A. H. Jafari, «Towards 1 Gbps/UE in Cellular Systems: Understanding Ultra-Dense Small Cell Deployments.,» *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 17, n° 4, pp. 2078-2101, 2015.
- [99] H. Tabassum, M. Salehi y E. Hossain, «Fundamentals of mobility-aware performance characterization of cellular networks: A tutorial.,» *IEEE Communications Surveys Tutorials*, pp. 1-1, 2019.
- [100] Ericsson, «“Mobility Report,” White Paper,» Ericsson, 2017. [En línea]. Available: “Mobility Report,” White Paper,.
- [101] F. Lagum, Q.-N. Le-The, T. Beitelmal, S. S. Szyszkowicz y H. Yanikomeroglu, «Cell Switch-Off for Networks Deployed With Variable Spatial Regularity,» *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 6, n° 2, p. 234–237, 2017.
- [102] G. D. Gonzalez, H. J, Y. H, G.-L. M y S. G, «A Novel Multiobjective Cell Switch-Off Framework for Cellular Networks,» *IEEE Access*, vol. 4, p. 7883–7898, 2016.
- [103] D. G. González, E. Mutafungwa, B. Haile, J. Hamalainen y H. Poveda, «Planning and Optimization Framework for Ultra Dense Cellular Deployments,» *Mobile Information Systems*, vol. 2017, pp. 1-17, 2017.

## 9. Apéndices

### 9.1 Ilustraciones

#### Capítulo 1

Figura 1-1. Evolución de las redes inalámbricas. [1].....	2
Figura 1-2. Espectro disponible en la banda de ondas milimétricas. [3].....	5
Figura 1-3. Sistemas MIMO 2x2 y 2x3 .....	6
Figura 1-4. Transmisiones MIMO. [6].....	7
Figura 1-5. Esquema de <i>cooperative MIMO schemes in cellular systems</i> . [7] .....	8
Figura 1-6. Gráfica de fixed relay y mobile relay. ....	9
Figura 1-7. Estructura general de red 5G. [1] .....	13
Figura 1-8. Esquema de las relaciones entre las diferentes frecuencias. [31] .....	15
Figura 1-9. Arquitectura de redes celulares 5G con ondas milimétricas, y permitiendo comunicaciones D2D. [31].....	20
Figura 1-10. Evolución de las conexiones inalámbricas. [34] .....	21
Figura 1-11. Frase resumen de la filosofía de Internet de las Cosas. [34] .....	21
Figura 1-12. La tecnología 5G y la transformación digital. [35] .....	25
Figura 1-13. Bandas de frecuencias identificadas para 5 G en Europa y posibles casos de uso. [35] .....	26
Figura 1-14. Escenarios de uso de 5G. [3].....	27
Figura 1-15. Evolución de los ingresos de las empresas por líneas móviles. [42] .....	30
Figura 1-16. Tráfico medio por línea a lo largo de los años. [42].....	31
Figura 1-17. Ingresos obtenidos por los operadores por servicios de voz y mensajes. [42].....	32
Figura 1-18. Ingresos obtenidos por los operadores por banda ancha móvil. [42].....	33
Figura 1-19. Ingresos obtenidos por los operadores por banda ancha móvil. [43].....	34
Figura 1-20. Tipo de tecnologías de conexión móvil banda ancha por regiones del mundo. [43].....	35

#### Capítulo 2

Figura 2-1. Sistema D-MIMO con diferentes configuraciones de propagación en cada nodo.....	47
Figura 2-2. Comparación sistemas SIMO, MIMO y DMIMO. ....	52
Figura 2-3. Comparación sistemas Teórico y DMIMO .....	54
Figura 2-4. Análisis de sistemas MIMO en función del grado de correlación.....	55
Figura 2-5. Análisis de sistemas DMIMO en función del grado de correlación.....	57
Figura 2-6. Análisis de sistemas teórico y mejor DMIMO.....	58

#### Capítulo 3

Figura 3-1. Gráfica de resultados de capacidad. HM-SDM-5BS-5X3-a.....	62
Figura 3-2. Gráfica de resultados de capacidad. HM-SDM-5BS-5X3-b .....	64
Figura 3-3. Gráfica resultados de capacidad. HM-SDM-3BS-5X3 .....	66
Figura 3-4. Gráfica resultados de capacidad. HM-SDM-2BS-5X3 .....	68
Figura 3-5. Gráfica resultados de capacidad. HM-SDM-1BS-5X3. ....	70
Figura 3-6. Gráfica resultados de capacidad. HM-SDM-7BS-7X3. ....	73
Figura 3-7. Gráfica resultados de capacidad. HM-SDM-4BS-7X3. ....	74
Figura 3-8. Gráfica resultados de capacidad. HM-SDM-3BS-7X3. ....	76
Figura 3-9. Gráfica resultados de capacidad. HM-SDM-1BS-7X37. ....	78
Figura 3-10. Gráfica resultados de capacidad. HM-SDM-7BS-10X3. ....	80

Figura 3-11. Gráfica resultados de capacidad. HM-SDM-5BS-10X3. ....	82
Figura 3-12. Gráfica resultados de capacidad. HM-SDM-2BS-10X3. ....	84
Figura 3-13. Gráfica resultados de capacidad. HM-SDM-1BS-10X30. ....	86
Figura 3-14. Gráfica resultados de capacidad. HM-SDM-7BS-20X3. ....	88
Figura 3-15. Gráfica resultados diferencia entre HT y HM-SDM-7BS-20X3. ....	89
Figura 3-16. Gráfica resultados de capacidad. HM-SDM-5BS-20X3. ....	91
Figura 3-17. Gráfica resultados diferencia entre HT y HM-SDM-5BS-20X3. ....	92
Figura 3-18. Gráfica resultados de capacidad. HM-SDM-2BS-20X3. ....	94
Figura 3-19. Gráfica resultados diferencia entre HT y HM-SDM-2BS-20X3. ....	95
Figura 3-20. Gráfica resultados de capacidad. HM-SDM-7BS-40X3. ....	97
Figura 3-21. Gráfica resultados de capacidad. HM-SDM-4BS-40X30. ....	99

#### Capítulo 4

Figura 4-1. Gráfica resultados de capacidad. HM-SDM-PV-A,B,C,D,E-5BS-5X3-1-A1 .....	105
Figura 4-2. Gráfica resultados de capacidad. HM-SDM-PV-A,B,C,D,E-5BS-5X3-1-A2 .....	107
Figura 4-3. Gráfica resultados de capacidad. HM-SDM-PV-A,B,C,D,E-5BS-5X3-1-A3 .....	109
Figura 4-4. Gráfica resultados de capacidad. HM-SDM-PV-A,B,C,D,E-5BS-5X3-1-A3-3D.....	110
Figura 4-5. Gráfica resultados de capacidad. HM-SDM-PV-A,B,C,D,E-5BS-5X3-1-A3-detall.....	111
Figura 4-6. Gráfica resultados de capacidad. HM-SDM-PV-A,B,C,D,E-5BS-5X3-1-A4.....	113
Figura 4-7. Gráfica resultados de capacidad. HM-SDM-PV-C,D,E,F,G-5BS-5X3-1,12-A5 .....	115
Figura 4-8. Gráfica resultados de capacidad. HM-SDM-PV-C,D,E,F,G-5BS-5X3-1,12-A5-3D .....	116
Figura 4-9. Gráfica resultados de capacidad. HM-SDM-PV-A,B,C,D,E-5BS-5X3-1-A5-detall.....	117
Figura 4-10. Gráfica resultados de capacidad. HM-SDM-PV-A,B,E,F,G-5BS-5X3-1,6-A6 .....	118
Figura 4-11. Gráfica resultados de capacidad. HM-SDM-PV-A,C,E,F,G-5BS-5X3-1,12-A7 .....	120
Figura 4-12. Gráfica resultados de capacidad. HM-SDM-PV-A,B,C-3BS-5X3-1,2-A .....	122
Figura 4-13. Gráfica resultados de capacidad. HM-SDM-PV-C,D,E-3BS-5X3-1,6-B .....	124
Figura 4-14. Gráfica resultados de capacidad. HM-SDM-PV-C,F,G-3BS-5X3-1,12-C.....	125
Figura 4-15. Gráfica resultados de capacidad. HM-SDM-PV-A,B,C,D,E-5BS-10X3-1,2-B1 .....	127
Figura 4-16. Gráfica resultados de capacidad. HM-SDM-PV-A,B,E,F,G-5BS-10X3-1,5-B2 .....	129
Figura 4-17. Gráfica resultados de capacidad. HM-SDM-PV-A,B,C,D,F-5BS-10X3-6,12-B3 .....	130
Figura 4-18. Gráfica resultados de capacidad. HM-SDM-PV-A,B,C,D,E-5BS-10X3-1,2-B4 .....	132

#### Capítulo 5

Figura 5-1. Resultados de capacidad. HS-SM-28G-RMa-UMa-NLOS-30x4.....	143
Figura 5-2. Resultados de capacidad. HS-SM-28G-UMi- diferencia RMa valor teórico-30x4 .....	143
Figura 5-3. Resultados de capacidad. HS-SM-40G-RMa-UMa-NLOS-30x4.....	144
Figura 5-4. Resultados de capacidad. HS-SM-40G-UMi-LOS-30x4 .....	145
Figura 5-5. Resultados de capacidad. HS-SM-78G-RMa- UMa-NLOS-30x4.....	146
Figura 5-6. Resultados de capacidad. HS-SM-78G-UMi-LOS-30x4 .....	146
Figura 5-7. Resultados de capacidad. HS-SDM-28G-diferencia-3BS-30x4.....	148
Figura 5-8. Resultados de capacidad. HS-SDM-40G-3BS-30x4 .....	149
Figura 5-9. Resultados de capacidad. HS-SDM-78G-3BS-30x4 .....	150
Figura 5-10. Resultados de capacidad. HS-SDM-diferencia-28G-3BS-NC-30x4 .....	151
Figura 5-11. Resultados de capacidad. HS-SDM-40G-3BS-NC-30x4 .....	152
Figura 5-12. Resultados de capacidad. HS-SDM-78G-3BS-NC-30x4 .....	153
Figura 5-13. Resultados de capacidad. HS-SDM-3BS-RMa-diferencia-30x4.....	154
Figura 5-14. Resultados de capacidad. HS-SDM-3BS-UMa-diferencia-30x4 .....	155
Figura 5-15. Resultados de capacidad. HS-SDM-3BS-UMi-diferencia-30x4 .....	156
Figura 5-16. Comparativa RMa. HS-SDM-2BS-RMa-30x4 .....	157
Figura 5-17. Comparativa UMa. HS-SDM-2BS-UMa-30x4 .....	158
Figura 5-18. Comparativa UMi. HS-SDM-2BS-UMi-30x4 .....	159
Figura 5-19. Comparativa escenarios y visibilidad. HS-SDM-2BS-30x4 .....	160
Figura 5-20. Resultados de capacidad. HS-SM-SDM-28G-30x4 .....	162
Figura 5-21. Resultados de capacidad. HS-SM-SDM-28G-30x4-Diferencia .....	163
Figura 5-22. Resultados de capacidad. HS-SM-SDM-40G-30x4 .....	164
Figura 5-23. Resultados de capacidad. HS-SM-SDM-40G-30x4-Diferencia .....	165

Figura 5-24. Resultados de capacidad. HS-SM-SDM-78G-30x4 .....	166
Figura 5-25. Resultados de capacidad. HS-SDM-3BS-28G-60x4 .....	168
Figura 5-26. Resultados de capacidad. HS-SDM-28G-3BS-60x4-diferencia .....	168
Figura 5-27. Resultados de capacidad. HS-SDM-3BS-40G-60x4 .....	169
Figura 5-28. Resultados de capacidad. HS-SDM-3BS-78G-60x4 .....	170
Figura 5-29. Comparativa CM escenario RMa. HS-SM-30x10 .....	172
Figura 5-30. Resultados de CM. HS-SM-10G-UMa-LOS-30x10 .....	173
Figura 5-31. Resultados de CM. HS-SM-10G-UMi-LOS-30x10 .....	174
Figura 5-32. Comparativa a 10GHZ. HS-SDM-5BS -10G-50x10-a .....	176
Figura 5-33 . Comparativa a 28GHZ. HS-SDM-5BS -28G-50x10-a .....	177
figura 5-34. Comparativa a 40 GHZ. HS-SDM-5BS -40G-50x10-a .....	178
Figura 5-35. Comparativa a 10 GHZ. Sistema No correlado. HS-SDM-5BS-10G-50x10-b .....	180
Figura 5-36. Comparativa a 28 GHZ. Sistema No correlado. HS-SDM-5BS-28G-50x10-b .....	180
figura 5-37. Comparativa a 28 GHZ. Sistema No correlado. HS-SDM-5BS-40G-50x10-b .....	181
Figura 5-38. Comparativa a 10 GHZ. Sistemas RMa y UMa, correl. y No correl. ....	182
Figura 5-39. Comparativa RMa. HS-SDM-2BS-RMa-50x10 .....	184
Figura 5-40. Comparativa UMa. HS-SDM-2BS-UMa-50x10 .....	185
Figura 5-41. Comparativa UMi. HS-SDM-3BS-UMi-50x10 .....	186
Figura 5-42. Comparativa escenarios y visibilidad HS-SDM-2BS-50x10 .....	187

## Capítulo 6

Figura 6-1. Consumo energético y emisiones de CO <sub>2</sub> . [92] .....	191
Figura 6-2. Consumos energéticos en las BS. [92] .....	192
Figura 6-3. Diferentes escenarios de propagación. Naranja “UMA LOS”, Rosa “UMA NLOS” Rojo “UMi LOS”, Púrpura “UMi NLOS” Azul “RMa LOS” y Verde “RMa NLOS”. [97] .....	194
Figura 6-4 .Diferentes modelos de movilidad aplicables al análisis de redes celulares [99]. .....	195
Figura 6-5. Distribución de Usuarios por tipo de BS para una potencia distribuida configuración: A .....	197
Figura 6-6. Distribución de Usuarios por tipo de BS para una potencia distribuida configuración: D .....	198
Figura 6-7. Gráfica de eficiencia con respecto a número de BS .....	199
Figura 6-8. Gráfica de eficiencia con respecto al número de usuarios .....	200
Figura 6-9. Gráfica en 3D, de la potencia y la capacidad en función de los handovers. ....	201
Figura 6-10. Gráfica de la capacidad en función de la potencia consumida. ....	202

## 9.2 Relación de tablas

### Capítulo 1

Tabla 1-1. Esquema de las relaciones entre las diferentes frecuencias. [2] .....	4
--	---

### Capítulo 2

Tabla 2-1. Resumen de los resultados de medidas realizadas en ondas milimétricas en diferentes escenarios de propagación, en diferentes sitios.....	42
Tabla 2-2. Tabla de simuladores de rayo directo.....	45
Tabla 2-3. Nomenclatura. Índice.....	49
Tabla 2-4. Nomenclatura. Sistema Teórico.....	50
Tabla 2-5. Nomenclatura. Sistema MIMO.....	50
Tabla 2-6. Nomenclatura. Sistema DMIMO.....	50

### Capítulo 3

Tabla 3-1. Antenas elegidas. HM-SDM-5BS-5X3-a .....	62
Tabla 3-2. Antenas elegidas. HM-SDM-5BS-5X3-b.....	64
Tabla 3-3. Antenas elegidas. HM-SDM-3BS-5X3 .....	65
Tabla 3-4. Antenas elegidas. HM-SDM-2BS-5X3 .....	67
Tabla 3-5. Antenas elegidas. HM-SDM-1BS-5X3.....	69
Tabla 3-6. Antenas elegidas. HM-SDM-7BS-7X3.....	72
Tabla 3-7. Antenas elegidas. HM-SDM-4BS-7X3.....	74
Tabla 3-8. Antenas elegidas. HM-SDM-3BS-7X3.....	76
Tabla 3-9. Antenas elegidas. HM-SDM-1BS-7X3.....	77
Tabla 3-10. Antenas elegidas. HM-SDM-7BS-10X3.....	80
Tabla 3-11. Antenas elegidas. HM-SDM-5BS-10X3.....	82
Tabla 3-12. Antenas elegidas. HM-SDM-2BS-10X3.....	83
Tabla 3-13. Antenas elegidas. HM-SDM-1BS-10X3.....	85
Tabla 3-14. Antenas elegidas. HM-SDM-7BS-20X3.....	88
Tabla 3-15. Antenas elegidas. HM-SDM-5BS-20X3.....	90
Tabla 3-16. Antenas elegidas. HM-SDM-2BS-20X3.....	93
Tabla 3-17. Antenas elegidas. HM-SDM-7BS-40X3.....	97
Tabla 3-18. Antenas elegidas. HM-SDM-4BS-40X3.....	98
Tabla 3-19. conclusiones .....	100

### Capítulo 4

Tabla 4-1. Valores de potencia normalizada de cada antena, de cada BS.....	103
Tabla 4-2. Valor medio de potencia normalizada emitida por cada BS.....	104
Tabla 4-3. Antenas elegidas caso: HM-SDM-PV-A,B,C,D,E,F-5BS-5X3-1-A1 .....	105
Tabla 4-4. Potencias emitidas por cada BS en función del atenuador pot1.....	106
Tabla 4-5. Antenas elegidas caso: HM-SDM-PV-A,B,C,D,E,F-5BS-3X5-1-A2 .....	106
Tabla 4-6. Potencias emitidas por cada BS en función del atenuador pot1.....	108
Tabla 4-7. Antenas elegidas caso: HM-SDM-PV-A,B,C,D,E-5BS-5X3-1-A3 .....	108
Tabla 4-8. Varianzas para el análisis: HM-SDM-PV-A,B,C,D,E-5BS-5X3-1-A3 .....	112
Tabla 4-9. Antenas elegidas caso: HM-SDM-PV-A,B,C,D,E-5BS-5X3-1-A4 .....	112
Tabla 4-10. Varianzas para el análisis: HM-SDM-PV-A,B,C,D,E-5BS-5X3-1-A4.....	113
Tabla 4-11. Antenas elegidas caso: HM-SDM-PV-C,D,E,F,G-5BS-5X3-1,12-A5 .....	114
Tabla 4-12. Varianzas para el análisis: HM-SDM-PV-C,D,E,F,G-5BS-5X3-1,12-A5.....	115
Tabla 4-13. Antenas elegidas caso: HM-SDM-PV-A,B,E,F,G-5BS-5X3-1,6-A6.....	117

Tabla 4-14. Varianzas para el análisis: HM-SDM-PV-A,B,E,F,G-5BS-5X3-1,6-A6.....	119
Tabla 4-15. Antenas elegidas caso: HM-SDM-PV-A,C,E,F,G-5BS-5X3-1,12-A7.....	119
Tabla 4-16. Varianzas para el análisis: HM-SDM-PV-A,C,E,F,G-5BS-5X3-1,12-A7.....	120
Tabla 4-17. Antenas elegidas caso: HM-SDM-PV-A,B,C-3BS-5X3-1,2-A.....	121
Tabla 4-18. Varianzas para el análisis: HM-SDM-PV-A,B,C-3BS-5X3-1,2-A.....	123
Tabla 4-19. Antenas elegidas caso: HM-SDM-PV-C,D,E-3BS-5X3-1,6-B.....	123
Tabla 4-20. Varianzas para el análisis: HM-SDM-PV-C,D,E-3BS-5X3-1,6-B.....	124
Tabla 4-21. Antenas elegidas caso: HM-SDM-PV-C,F,G-3BS-5X3-1,12-C.....	125
Tabla 4-22. Varianzas para el análisis: HM-SDM-PV-C,F,G-3BS-5X3-1,12-C.....	126
Tabla 4-23. Antenas elegidas caso: HM-SDM-PV-A,B,C,D,E-5BS-10X3-1,2-B1.....	127
Tabla 4-24. Varianzas para el análisis: HM-SDM-PV-A,B,C,D,E-5BS-10X3-1,2-B1.....	128
Tabla 4-25. Antenas elegidas caso: HM-SDM-PV-A,B,E,F,G-5BS-10X3-1,5-B2.....	128
Tabla 4-26. Varianzas para el análisis: HM-SDM-PV-A,B,E,F,G-5BS-10X3-1,5-B2.....	129
Tabla 4-27. Antenas elegidas caso: HM-SDM-PV-A,B,C,D,F-5BS-10X3-6,12-B3.....	130
Tabla 4-28. Varianzas para el análisis: HM-SDM-PV-A,B,C,D,F-5BS-10X3-6,12-B3.....	131
Tabla 4-29. Antenas elegidas caso: HM-SDM-PV-A,B,C,D,E-5BS-10X3-1,2-B4.....	131
Tabla 4-30. Varianzas para el análisis: HM-SDM-PV-A,B,C,D,E-5BS-10X3-1,2-B4.....	132

## Capítulo 5

Tabla 5-1. Parámetros de simulación.....	136
Tabla 5-2. Nomenclatura. Índice.....	138
Tabla 5-3. Nomenclatura. Sistema teórico.....	138
Tabla 5-4. Nomenclatura. Sistema MIMO.....	139
Tabla 5-5. Nomenclatura. Sistema DMIMO.....	139
Tabla 5-6. Antenas elegidas. HS-SM-30x4.....	142
Tabla 5-7. Sistemas analizados HS-SM-28G-UMi-30x4.....	142
Tabla 5-8. Sistemas analizados HS-SM-40G-30x4.....	144
Tabla 5-9. Sistemas analizados HS-SM-78G-30x4.....	145
Tabla 5-10. Antenas elegidas. HS-SDM-3BS-30x4-A1.....	148
Tabla 5-11. Escenarios analizados. HS-SDM-3BS-30x4-A1.....	148
Tabla 5-12. Antenas elegidas. HS-SDM-3BS-NC-30x4.....	150
Tabla 5-13. Escenarios analizados. HS-SDM-3BS-NC-30x4.....	151
Tabla 5-14. Sistemas analizados. HS-DM-SDM-3BS-30x4.....	154
Tabla 5-15. Sistemas MIMO y DMIMO analizados.....	162
Tabla 5-16. Antenas elegidas. HS-SDM-3BS-60x4.....	167
Tabla 5-17. Escenarios analizados. HS-SDM-3BS-30x4.....	167
Tabla 5-18. Análisis sistema MIMO. HS-SM-30x10.....	171
Tabla 5-19. Escenarios analizados. HS-SM-30x10.....	171
Tabla 5-20. Escenarios analizados. HS-SM-30x10-a.....	176
Tabla 5-21. Escenarios analizados. HS-SM-30x10-b.....	179
Tabla 5-22. Escenarios analizados. HS-SDM-2BS-50x10.....	183

## Capítulo 6

Tabla 6-1. Potencias emitidas por cada BS en cada configuración.....	197
--	-----



### 9.3 Ecuaciones

#### Capítulo 2

Ecuación 2-1 .....	45
Ecuación 2-2 .....	45
Ecuación 2-3 .....	48

#### Capítulo 6

Ecuación 6-1 .....	193
Ecuación 6-2 .....	193
Ecuación 6-3 .....	193
Ecuación 6-4 .....	194
Ecuación 6-5 .....	194
Ecuación 6-6 .....	194
Ecuación 6-7 .....	194
Ecuación 6-8 .....	195
Ecuación 6-9 .....	195

## 9.4 Acrónimos

1G	1ª Generación de comunicaciones móviles
2G	2ª Generación de comunicaciones móviles
3G	3ª Generación de comunicaciones móviles
3GPP	3rd Generation Partnership Project
4G	4ª Generación de comunicaciones móviles
5G	5ª Generación de comunicaciones móviles
5GCM	5G, Connectivity and Mobility
5GNOW	5th Generation Non-Orthogonal Waveforms
5GPPP	The 5G Infrastructure Public Private Partnership
ACR	Adjacent Cell Restart
AoA	Angle of Arrival
AoD	Angle of Departure
AP	Access Point
ARPU	Average Revenue Per User
BER	Bit Error Rate
BFDM	Biorthogonal Frequency Division Multiplex
BS	Base Station
CDMA	Code Division Multiple Access
CN	Condition Number
CNMC	Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia
CoMP	Coordinated Multipoint
CR	Cámara de Reverberación
CSO	Cell Switch Off
D2D	Device to Device
DAS	Distributed Antenna System
DMIMO	Distributed Multiple-input Multiple-output
DM-MIMO	Sistemas MIMO Distribuidos Masivos
DVB	Digital Video Broadcasting
eMBB	Enhanced Mobile Broadband
EMPhAtiC	Enhanced Multicarrier Technology for Professional Ad-Hoc and Cell-Based Communications
FBMC	Filter Bank Multi-Carrier (FBMC)
FDMA	Frequency Division Multiple Access
GFDM	Generalized Frequency Division Multiplexing
GHz	Giga Hercios
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile communications
HPBW	Half-Power-Beamwidth
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access
HSUPA	High Speed Uplink Packet Access
ICT	Infraestructura Comunes de Telecomunicación

IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IMT-2020	International Mobile Telecommunications-2020
InH	Indoor Hotspot
IoT	Internet of Things
LOS	Line of Sight
LTE	Long-Term Evolution technology
M2M	Machine to Machine
METIS	Mobile and Wireless Communications Enablers for the Twenty-Ywenty Information Society
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output
MIWEBA	mmWave Evolution for Backhaul and Access
mmMAGIC	Millimetre-Wave Based Mobile Radio Access Network
mMTC	Massive Machine Type Communications
mmWave	Millimeter Wve
MS	Mobile Station
NEWCOM#	Network of Excellence in Wireless Communications
NLOS	No Line of Sight
NRX	Número de antenas receptoras
NSGA-II	Non-Domitated Sorting Genetic Algorithm II,
NTX	Número de antenas transmisoras
NYU	New York University
NYU WIRELESS	New York University WIRELESS
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
PC	Personal Computer
QoS	Quality of Service
RMa	Rural Macrocell
RWP	Random Way Point Mobility
SCM	Spatial Channel Model
SINR	Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio
SISO	Single-Input and Single-Output,
SMS	Short Message Service
TDMA	Time Division Multiple Access
TDT	Televisión Digital Terrestre
ToA	Time of Arrival
UDN	Ultra Dense Network
UE	User Equipment
UFMC	Universal Filtered Multi-Carrier
UIT	Unión Internacional de Telecomunicaciones
UMa	Urban Macrocell
UMi	Urban Microcell
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
URLLC	Ultra-Reliable Low-Latency Communications
UTP	Unshielded Twisted Pair
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access
WINNER	Wireless World Initiative New Radio
WRC-19	World Radiocommunication Conference 2019