

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

Estudio de técnicas de conformado de haz en sistemas MIMO multiusuario



AUTORA

Miriam Montes Villasevil

Ingeniería de Telecomunicaciones

TUTORA PROYECTO

Matilde Pilar Sánchez Fernández

DEPARTAMENTO

Teoría de la Señal y Comunicaciones





Índice

1. Introducción.....	13
1.1. Objetivos.....	14
2. Canal de comunicaciones móviles.....	15
2.1. Pérdidas de propagación.....	16
2.2. Desvanecimiento por bloqueos.....	16
2.3. Desvanecimiento por multitrayecto.....	17
2.3.1. Desvanecimiento plano.....	19
2.3.2. Desvanecimiento selectivo en frecuencia.....	20
2.4. Efecto Doppler.....	21
2.4.1. Desvanecimiento rápido.....	22
2.4.2. Desvanecimiento lento.....	23
3. Sistemas MIMO en conformado de haz.....	25
3.1. Información general de los sistemas MIMO.....	25
3.2. Principales ventajas.....	26
3.3. Conformación de haz.....	27
3.3.1. Arrays lineales.....	30
3.3.1.1. Arrays lineales y de amplitud uniforme.....	32
3.4. MIMO en conformado de haz.....	35
4. Modelado del sistema.....	39
4.1. Notación.....	40
4.2. Canal MIMO multiusuario.....	41
4.3. Señal de entrada.....	43
4.3.1. Señal de información.....	44
4.3.2. Matriz de conformación de haz.....	44
4.4. Cálculo de prestaciones.....	45
4.4.1. SINR.....	45
4.4.2. Información mutua.....	46
5. Resultados del proyecto.....	49
5.1. Escenario de la simulación.....	49
5.2. Resultados.....	50
5.2.1. Diagramas de radiación.....	50
5.2.1.1. $K=3$	51
5.2.1.1.1. $M=2$	51
5.2.1.1.2. $M=3$	54
5.2.1.1.3. $M=4$	56



5.2.1.1.4. $M=5$	58
5.2.1.1.5. $M=6$	60
5.2.1.1.6. $M=7$	62
5.2.1.1.7. $M=8$	64
5.2.1.1.8. $M=9$	66
5.2.1.1.9. $M=10$	68
5.2.1.2. $K=5$	70
5.2.1.2.1. $M=2$	70
5.2.1.2.2. $M=3$	73
5.2.1.2.3. $M=4$	76
5.2.1.2.4. $M=5$	79
5.2.1.2.5. $M=6$	82
5.2.1.2.6. $M=7$	85
5.2.1.2.7. $M=8$	88
5.2.1.2.8. $M=9$	91
5.2.1.2.9. $M=10$	94
5.2.2. SINR	97
5.2.2.1. SINR para tres usuarios en ausencia de ruido	99
5.2.2.1.1. $ASD=360^\circ$	99
5.2.2.1.2. $ASD=20^\circ$	103
5.2.2.2. SINR para tres usuarios en presencia de ruido	106
5.2.2.2.1. $ASD=360^\circ$	106
5.2.2.2.2. $ASD=20^\circ$	110
5.2.2.3. SINR para cinco usuarios en ausencia de ruido	114
5.2.2.3.1. $ASD=360^\circ$	114
5.2.2.3.2. $ASD=20^\circ$	118
5.2.2.4. SINR para cinco usuarios en presencia de ruido	122
5.2.2.4.1. $ASD=360^\circ$	122
5.2.2.4.2. $ASD=20^\circ$	126
5.2.3. Información Mutua	130
5.2.3.1. Información mutua para tres usuarios en ausencia de ruido	131
5.2.3.1.1. $ASD=360^\circ$	131
5.2.3.1.2. $ASD=20^\circ$	132
5.2.3.2. Información mutua para tres usuarios en presencia de ruido	133
5.2.3.2.1. $ASD=360^\circ$	133
5.2.3.2.2. $ASD=20^\circ$	134
5.2.3.3. Información mutua para cinco usuarios en ausencia de ruido	135
5.2.3.3.1. $ASD=360^\circ$	135



5.2.3.3.2. $ASD=20^\circ$	136
5.2.3.4. Información mutua para cinco usuarios en presencia de ruido	137
5.2.3.4.1. $ASD=360^\circ$	137
5.2.3.4.2. $ASD=20^\circ$	138
6. Conclusiones.....	139
7. Bibliografía.....	143





Índice de figuras

Figura 1: Propagación en entorno móvil	15
Figura 2: Multitrayecto	17
Figura 3: Canal de desvanecimiento plano	19
Figura 4: Características del canal de desvanecimiento plano	20
Figura 5: Canal de desvanecimiento selectivo en frecuencia	20
Figura 6: Características del canal de desvanecimiento selectivo en frecuencia	21
Figura 7: Espectro de un coeficiente de atenuación con un canal con Doppler	22
Figura 8: Canal de desvanecimiento rápido	22
Figura 9: Canal de desvanecimiento lento.....	23
Figura 10: Representación de un sistema MIMO	26
Figura 11: Representación espacial de varias antenas.....	28
Figura 12: Representación esquemática de una array sobre el eje Z.....	30
Figura 13: Diagrama de radiación	32
Figura 14: Diagrama de radiación de un array Broadside	33
Figura 15: Diagrama de radiación de un array de exploración en cartesianas (arriba) y en polares (abajo)	34
Figura 16: Diagrama de radiación de un array Endfire en cartesianas (arriba) y en polares (abajo)	35
Figura 17: Sistema MIMO multiusuario en conformado de haz en el enlace descendente	37
Figura 18: Esquema general del sistema	40
Figura 19: Escenario del sistema teniendo en cuenta el ángulo θ	43
Figura 20: Diagrama de radiación de 3 usuarios y 2 antenas	51
Figura 21: Diagrama de radiación de 3 usuarios y 3 antenas	54
Figura 22: Diagrama de radiación de 3 usuarios y 4 antenas	56
Figura 23: Diagrama de radiación de 3 usuarios y 5 antenas	58
Figura 24: Diagrama de radiación de 3 usuarios y 6 antenas	60
Figura 25: Diagrama de radiación de 3 usuarios y 7 antenas	62
Figura 26: Diagrama de radiación de 3 usuarios y 8 antenas	64
Figura 27: Diagrama de radiación de 3 usuarios y 9 antenas	66
Figura 28: Diagrama de radiación de 3 usuarios y 10 antenas	68
Figura 29: Diagrama de radiación de 5 usuarios y 2 antenas	70
Figura 30: Diagrama de radiación de 5 usuarios y 3 antenas	73
Figura 31: Diagrama de radiación de 5 usuarios y 4 antenas	76
Figura 32: Diagrama de radiación de 5 usuarios y 5 antenas	79
Figura 33: Diagrama de radiación de 5 usuarios y 6 antenas	82
Figura 34: Diagrama de radiación de 5 usuarios y 7 antenas	85
Figura 35: Diagrama de radiación de 5 usuarios y 8 antenas	88
Figura 36: Diagrama de radiación de 5 usuarios y 9 antenas	91
Figura 37: Diagrama de radiación de 5 usuarios y 10 antenas	94
Figura 38: Comparativa ASD, 360° (izquierda), 20° (derecha).....	97
Figura 39: SINR para tres usuarios con ASD de 360° en ausencia de ruido	99



Figura 40: SINR para tres usuarios con ASD de 20° en ausencia de ruido.....	103
Figura 41: SINR para tres usuarios con ASD de 360° en presencia de ruido.....	106
Figura 42: SINR para tres usuarios con ASD de 20° en presencia de ruido.....	110
Figura 43: SINR para cinco usuarios con ASD de 360° en ausencia de ruido	114
Figura 44: SINR para cinco usuarios con ASD de 20° en ausencia de ruido	118
Figura 45: SINR para cinco usuarios con ASD de 360° en presencia de ruido.....	122
Figura 46: SINR para cinco usuarios con ASD de 20° en presencia de ruido.....	126
Figura 47: Información mutua para tres usuarios con ASD de 360° en ausencia de ruido	131
Figura 48: Información mutua para tres usuarios con ASD de 20° en ausencia de ruido	132
Figura 49: Información mutua para tres usuarios con ASD de 360° en presencia de ruido	133
Figura 50: Información mutua para tres usuarios con ASD de 20° en presencia de ruido	134
Figura 51: Información mutua para cinco usuarios con ASD de 360° en ausencia de ruido.....	135
Figura 52: Información mutua para cinco usuarios con ASD de 20° en ausencia de ruido	136
Figura 53: Información mutua para cinco usuarios con ASD de 360° en presencia de ruido.....	137
Figura 54: Información mutua para cinco usuarios con ASD de 20° en presencia de ruido.....	138



Índice de ecuaciones

Ecuación 1: Potencia recibida en espacio libre	16
Ecuación 2: Pérdidas de la distribución log-normal	16
Ecuación 3: Función de correlación	17
Ecuación 4: Transformada de Fourier de la respuesta al impulso	18
Ecuación 5: Media y desviación típica de $H(f)$	18
Ecuación 6: Función de correlación	18
Ecuación 7: Función de correlación simplificada.....	18
Ecuación 8: Función de correlación simplificada en función de la frecuencia	18
Ecuación 9: Ancho de banda de coherencia	18
Ecuación 10: Raíz cuadrada de la media del retardo de dispersión.....	18
Ecuación 11: Media del retardo de dispersión.....	19
Ecuación 12: Ancho de banda Doppler	21
Ecuación 13: Tiempo de coherencia asociado al efecto Doppler	21
Ecuación 14: Campo radiado por un elemento del array.....	29
Ecuación 15: Campo radiado por un array	29
Ecuación 16: Factor de array	29
Ecuación 17: Campo radiado por un array	29
Ecuación 18: Desarrollo del factor de array	30
Ecuación 19: Factor de array de un array lineal y de amplitud uniforme	32
Ecuación 20: Módulo del Factor de array de un array lineal y de amplitud uniforme ...	32
Ecuación 21: Ecuación general del sistema.....	40
Ecuación 22: Matriz del canal MIMO multiusuario.....	41
Ecuación 23: Matriz del canal simplificada	41
Ecuación 24: Matriz de covarianza en transmisión	42
Ecuación 25: Señal de entrada.....	43
Ecuación 26: Señal de información	44
Ecuación 27: Potencia de la señal de información	44
Ecuación 28: Matriz de conformación de haz	44
Ecuación 29: Vector de conformación de haz del usuario i	44
Ecuación 30: SINR enlace descendente	45
Ecuación 31: Expresión genérica de la información mutua	46
Ecuación 32: Señal de entrada para el cálculo de la información mutua	46
Ecuación 33: Señal de salida para el usuario i para el cálculo de la información mutua	46
Ecuación 34: Desarrollo señal de salida para el usuario 1	46
Ecuación 35: Matriz de covarianza completa del usuario 1	47
Ecuación 36: Matriz de covarianza simplificada del usuario 1	47
Ecuación 37: Matriz de covarianza de la interferencia y el ruido	47
Ecuación 38: Información mutua	48
Ecuación 39: Información mutua para el usuario 1	48
Ecuación 40: SINR del usuario i en el enlace descendente.....	98
Ecuación 41: Expresión genérica de la Información Mutua utilizada prácticamente ..	130





Índice de tablas

Tabla 1: Notación de señales, matrices y variables	40
Tabla 2: Valores significativos del diagrama de radiación de 3 usuarios y 2 antenas ...	52
Tabla 3: Valores significativos del diagrama de radiación de 3 usuarios y 3 antenas ...	54
Tabla 4: Valores significativos del diagrama de radiación de 3 usuarios y 4 antenas ...	56
Tabla 5: Valores significativos del diagrama de radiación de 3 usuarios y 5 antenas ...	58
Tabla 6: Valores significativos del diagrama de radiación de 3 usuarios y 6 antenas ...	60
Tabla 7: Valores significativos del diagrama de radiación de 3 usuarios y 7 antenas ...	62
Tabla 8: Valores significativos del diagrama de radiación de 3 usuarios y 8 antenas ...	64
Tabla 9: Valores significativos del diagrama de radiación de 3 usuarios y 9 antenas ...	66
Tabla 10: Valores significativos del diagrama de radiación de 3 usuarios y 10 antenas	68
Tabla 11: Valores significativos del diagrama de radiación de 5 usuarios y 2 antenas .	71
Tabla 12: Valores significativos del diagrama de radiación de 5 usuarios y 3 antenas .	73
Tabla 13: Valores significativos del diagrama de radiación de 5 usuarios y 4 antenas .	76
Tabla 14: Valores significativos del diagrama de radiación de 5 usuarios y 5 antenas .	79
Tabla 15: Valores significativos del diagrama de radiación de 5 usuarios y 6 antenas .	82
Tabla 16: Valores significativos del diagrama de radiación de 5 usuarios y 7 antenas .	85
Tabla 17: Valores significativos del diagrama de radiación de 5 usuarios y 8 antenas .	88
Tabla 18: Valores significativos del diagrama de radiación de 5 usuarios y 9 antenas .	91
Tabla 19: Valores significativos del diagrama de radiación de 5 usuarios y 10 antenas	94
Tabla 20: LTE Release 8 - Principales parámetros	139
Tabla 21: LTE Release 8 – Categorías de los equipos de los usuarios	139





1. Introducción

Hoy en día, las nuevas tecnologías relacionadas con las comunicaciones móviles están pidiendo cada vez un mayor ancho de banda y mejor señal para poder disfrutar de nuevos servicios adicionales. Los nuevos servicios que se están demandando son por ejemplo, el acceso a internet de banda ancha o a servicios multimedia a través de la red móvil. Todos estos nuevos servicios requieren evolucionar las redes móviles que existen en la actualidad teniendo que investigar nuevas soluciones para aumentar la potencia recibida y el ancho de banda, para poder enviar toda esta cantidad de información que los usuarios están demandando.

Conseguir aumentar las prestaciones de los sistemas de comunicaciones móviles no es tarea sencilla, ya que los canales inalámbricos sufren degradaciones importantes de la señal transmitida debido a las pérdidas asociadas a este tipo de canales como pueden ser las pérdidas por multitrayecto, las pérdidas por desvanecimiento, etc. Por tanto, vamos a necesitar enviar una señal de bastante potencia para que las pérdidas no nos impidan conseguir las prestaciones que necesitamos actualmente.

Los sistemas MIMO (*multiple-input multiple-output*) es una de las soluciones que se están barajando para poder conseguir mayor ancho de banda y aumentar las prestaciones de la señal recibida por los usuarios, [1]. Este sistema es uno de los que prometen conseguir mejores prestaciones consiguiendo aumentar la capacidad del canal y aumentar la cobertura.

Definimos un sistema MIMO como un tipo de tecnología utilizada en redes móviles que se basa en la utilización de varias antenas en el transmisor y en el receptor.

Se están investigando varios tipos de sistema MIMO para poder comparar con que técnicas de las utilizadas se obtienen mejores resultados. En este Proyecto Fin de Carrera se va a investigar las prestaciones de los sistemas MIMO multiusuario en conformado de haz.

Los sistemas MIMO multiusuario en conformado de haz están compuestos por un array de antenas en la estación base del transmisor que emiten a diferentes usuarios que están equipados en el caso de este estudio con una única antena.

La técnica de conformado de haz pretende explotar las diferentes configuraciones de los arrays de antenas para conseguir unos diagramas de radiación que emitan la mayor potencia en las direcciones en las que se encuentran los usuarios. Para ello, analiza las diferentes configuraciones de arrays para optimizar las prestaciones del sistema, viendo cuál es el número de antenas óptimo dependiendo del número de usuarios del sistema y su posición relativa respecto la estación base.

Con este tipo de sistemas se supone que se maximizará la SINR (relación señal a ruido interferencia), por lo que una de las medidas que se analizarán para ver las prestaciones de los sistemas MIMO multiusuario en conformado de haz será la SINR, además de analizar también la información mutua.



1.1. Objetivos

Cuando comenzamos el estudio de un sistema MIMO multiusuario en conformado de haz nos propusimos una serie de objetivos. Dichos objetivos se detallan a continuación:

1. Estudio teórico de los sistemas MIMO multiusuario en conformado de haz.
2. Análisis del canal de un sistema MIMO multiusuario en conformado de haz.
3. Diseño de los diferentes escenarios del sistema:
 - Número de usuarios.
 - Número de antenas transmisoras mínimas y máximas de la estación base.
 - Posición de los usuarios respecto a las antenas de la estación base.
4. Simulación de todo el sistema con la herramienta informática MATLAB®.
5. Análisis de los diagramas de radiación de los escenarios diseñados.
6. Cálculo de las prestaciones del sistema:
 - SINR
 - Información mutua
7. Análisis de las prestaciones del sistema.

A lo largo de los capítulos que componen este estudio veremos todos los puntos que nos propusimos como objetivos del estudio de este sistema.

2. Canal de comunicaciones móviles

Una transmisión inalámbrica es un enlace entre dispositivos en el que no hay cables conectando los diversos dispositivos, en [2] y [3]. Si un dispositivo es fijo se denomina estación base y si un dispositivo es móvil, se denomina estación móvil.

La antena de la estación móvil está generalmente cerca de la tierra, a la altura del usuario y a menudo no en la línea de visión de la estación base debido a los obstáculos del terreno. También se producen otros fenómenos debido a la propagación en un entorno móvil como la difracción, la absorción y la difusión. Además, también es muy importante el desvanecimiento por multitrayecto, fenómeno de la propagación de la señal transmitida por caminos diferentes. Estos efectos se muestran en la *Figura 1*.



Figura 1: Propagación en entorno móvil

Una señal que se propaga a través de un canal de comunicaciones móviles llega a su destino por medio de múltiples caminos, como hemos mencionado anteriormente. Los diferentes caminos por los que se transmite la señal surgen debido a los efectos de dispersión, reflexión y difracción del medio en el que se propaga la señal. Los diferentes mecanismos de propagación influyen en las diferentes pérdidas que se pueden dar debidas al canal y a los modelos de dispersión.

La reducción de la potencia en el receptor se debe a tres efectos fundamentalmente: a las pérdidas de propagación debido a los diferentes caminos que toma la señal (desvanecimiento por multitrayecto), a la dispersión macroscópica y a la dispersión microscópica. Las pérdidas de propagación se deben a la absorción de las moléculas de agua y a la reflexión en tierra principalmente. La dispersión macroscópica se produce por la reflexión de la señal en los edificios. Por último, la dispersión microscópica la provoca las combinaciones constructivas y destructivas de los múltiples caminos de la señal.

2.1. Pérdidas de propagación

Las pérdidas de propagación por distancia que toma la señal se pueden ver en la expresión de la potencia recibida en espacio libre o Fórmula de Friis,

$$P_{Rx} = P_{Tx} \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 G_{Tx} G_{Rx}$$

Ecuación 1: Potencia recibida en espacio libre

donde P_{Tx} y P_{Rx} es la potencia transmitida y recibida respectivamente, λ es la longitud de onda, G_{Tx} y G_{Rx} la ganancia de transmisión y recepción de las antenas respectivamente y d es la distancia de separación entre transmisor y receptor, [3].

Los modelos más comunes son el modelo Okumura-Hata, la Hata COST-231, entre otros, [3]. Los modelos elegidos dependen del canal del sistema que estemos analizando.

2.2. Desvanecimiento por bloqueos

El desvanecimiento de la señal debido a los bloqueos se debe a un fenómeno que se produce cuando las señales inalámbricas están obstruidas por grandes obstáculos tales como edificios, árboles, colinas, etc. Estos obstáculos causan la atenuación y la reflexión de la señal.

El nivel del bloqueo depende de la frecuencia de la señal, la estructura de obstáculos y el tamaño del objeto. La caracterización más común para modelar el desvanecimiento por bloqueos es la distribución log-normal.

Las pérdidas que modela la distribución log-normal se pueden ver en la siguiente expresión, [4]:

$$PL(d) = PL(d_0) + 10n \log \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_{\sigma}$$

The diagram illustrates the components of the log-normal distribution equation. The term $10n \log \left(\frac{d}{d_0} \right)$ is enclosed in a red box, with an arrow pointing to a box labeled "Componente de desvanecimiento Log-normal [dB]". The term X_{σ} is enclosed in a purple box, with an arrow pointing to a box labeled "Variable aleatoria Gaussiana [dB]".

Ecuación 2: Pérdidas de la distribución log-normal

siendo n un factor que caracteriza al medio.

2.3. Desvanecimiento por multitrayecto

El desvanecimiento por multitrayecto o también llamado pérdidas de pequeña escala, se debe a la reflexión de las señales inalámbricas en objetos que se encuentran en el camino entre el transmisor y el receptor. Debido al hecho de que todas las señales están siguiendo diferentes caminos para llegar al receptor, estas señales llegan al receptor con diferente fase. La señal resultante ha podido sufrir reflexiones constructivas o destructivas. El desvanecimiento depende de las fases de las distintas señales que están llegando al receptor y de su potencia relativa frente al resto de señales. Un método comúnmente usado para describir el efecto del desvanecimiento por multitrayecto es la distribución de Rayleigh, [4] y [3].

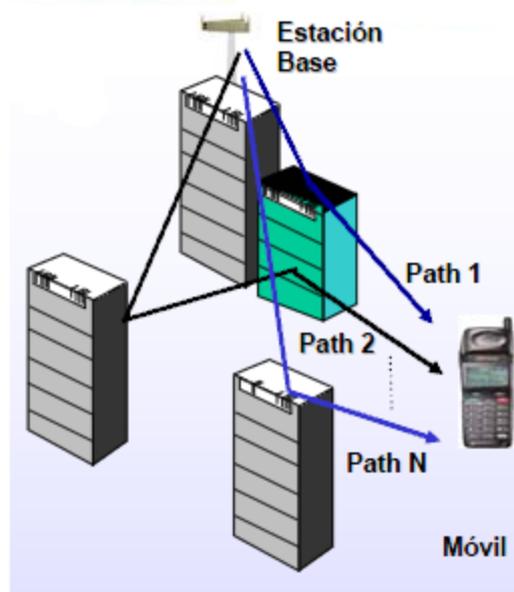


Figura 2: Multitrayecto

La dispersión de la señal debida al retardo de la señal puede tener dos consecuencias dependiendo del ancho de banda del símbolo: desvanecimiento plano o desvanecimiento selectivo en frecuencia.

Antes de ir más allá, es importante definir el ancho de banda de coherencia. Si la separación en frecuencia de dos componentes de frecuencia ($\Delta f = |f_2 - f_1|$) es mayor que el ancho de banda de coherencia, B_C , el desvanecimiento a estas frecuencias se dice que está incorrelado. La función de correlación se expresa como:

$$R_H(f, f + \Delta f) = \frac{\text{cov}(H(f), H(f + \Delta f))}{\sigma_{H(f)} \sigma_{H(f+\Delta f)}} = \frac{E[(H(f) - \mu_{H(f)})(H(f + \Delta f) - \mu_{H(f+\Delta f)})]}{\sigma_{H(f)} \sigma_{H(f+\Delta f)}}$$

Ecuación 3: Función de correlación

Siendo $\mu_{H(f)}$ la esperanza de $H(f)$, $\sigma_{H(f)}$ la desviación típica y $H(f)$ la transformada de Fourier de la respuesta al impulso $h(t)$. La expresión que define $H(f)$ es:

$$H(f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau$$

Ecuación 4: Transformada de Fourier de la respuesta al impulso

Si asumimos que:

$$\mu_{H(f)} = E[H(f)]$$

$$\sigma_{H(f)} = \sqrt{E[H(f)^2] - E[H(f)]^2}$$

Ecuación 5: Media y desviación típica de H(f)

la Ecuación 3 se puede expresar como:

$$R_H(f, f + \Delta f) = \frac{E[H(f)H^*(f + \Delta f)] - E[H(f)]E[H^*(f + \Delta f)]}{\sqrt{E[H(f)^2] - E[H(f)]^2} \sqrt{E[H(f + \Delta f)^2] - E[H(f + \Delta f)]^2}}$$

Ecuación 6: Función de correlación

Considerando H(f) normalizada, haciendo $\mu_{H(f)} = 0$ y $\sigma_{H(f)} = 1$, la ecuación resulta:

$$R_H(f, f + \Delta f) = E[H(f)H^*(f + \Delta f)]$$

Ecuación 7: Función de correlación simplificada

La ecuación anterior se puede expresar en función de la frecuencia como

$$R_H(\Delta f) = \int_{-\infty}^{\infty} P_h(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau$$

Ecuación 8: Función de correlación simplificada en función de la frecuencia

donde $P_h(\tau)$ es la densidad de potencia del retardo.

El ancho de banda de coherencia, B_C , se define como el menor valor de Δf para el que $R_H(\Delta f)$ sea igual a algún coeficiente de correlación adecuado. Es posible aproximar B_C por

$$B_C = \frac{1}{50\sigma_\tau}$$

Ecuación 9: Ancho de banda de coherencia

siendo σ_τ la raíz cuadrada de la media del retardo de dispersión, cuya expresión es:

$$\sigma_\tau = \sqrt{\bar{\tau}^2 - (\bar{\tau})^2}$$

Ecuación 10: Raíz cuadrada de la media del retardo de dispersión

La media del retardo de dispersión se puede expresar como

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_k P(\tau_k)\tau_k}{\sum_k P(\tau_k)}$$

Ecuación 11: Media del retardo de dispersión

donde $P(\tau_k)$ es la potencia del k -ésimo retardo.

2.3.1. Desvanecimiento plano

Si la dispersión del retardo del canal es menor que la duración del tiempo del símbolo, el canal se dice que es de desvanecimiento plano. En un canal de desvanecimiento plano no existe interferencia inter-simbólica (ISI). Esto quiere decir, que un canal de este tipo tiene una ganancia constante y una respuesta de fase lineal sobre un ancho de banda mayor que el ancho de banda de la señal transmitida, tal como se muestra en la siguiente figura:

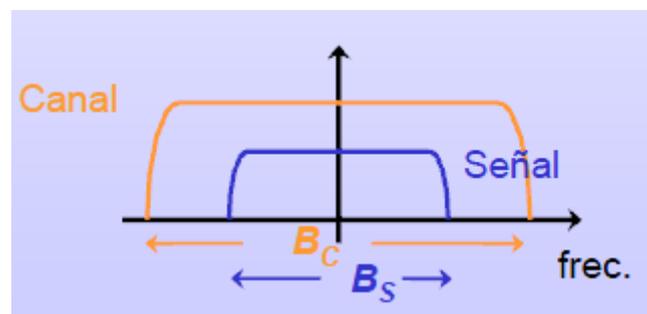


Figura 3: Canal de desvanecimiento plano

Por tanto las principales características de este tipo de canales son:

1. $B_S < B_C \rightarrow \sigma_\tau < T_s$, siendo B_S el ancho de banda de la señal transmitida, B_C el ancho de banda de coherencia, T_s el periodo de cada símbolo y σ_τ la raíz cuadrada de la media del retardo de dispersión.
2. Distribución Rayleigh, Ricean para modelar las pérdidas de potencia.
3. Conserva espectro de la señal transmitida.

En la siguiente figura también se resumen las características que hemos enumerado anteriormente:

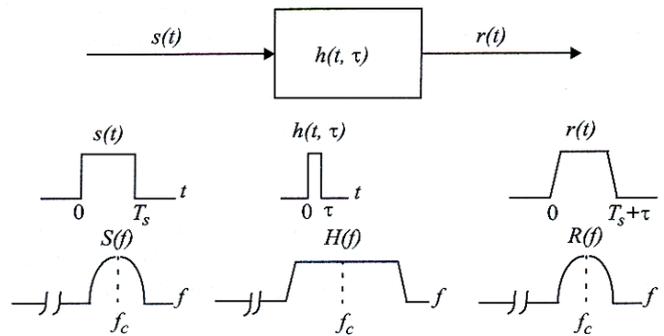


Figura 4: Características del canal de desvanecimiento plano

2.3.2. Desvanecimiento selectivo en frecuencia

Si el ancho de banda de la señal transmitida es mayor que el ancho de banda de coherencia del canal, este canal se dice que es de desvanecimiento selectivo en frecuencia. De este modo la señal recibida incluye varias versiones del mismo símbolo, cada uno retardado y atenuado. La señal recibida está distorsionada, lo que quiere decir que existe interferencia inter-simbólica (ISI). En el dominio de la frecuencia, esto significa que ciertos componentes de frecuencia en el espectro de la señal recibida tienen mayores ganancias que otros. La siguiente imagen muestra la respuesta de este tipo de canales:

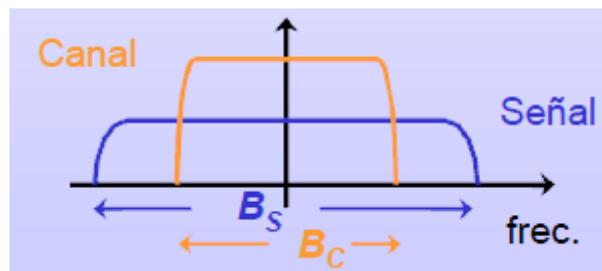


Figura 5: Canal de desvanecimiento selectivo en frecuencia

Por tanto las principales características de este tipo de canales son:

1. $B_S > B_C \rightarrow \sigma_\tau > T_s$, siendo B_S el ancho de banda de la señal transmitida, B_C el ancho de banda de coherencia, T_s el periodo de cada símbolo y σ_τ la raíz cuadrada de la media del retardo de dispersión.
2. Interferencia intersimbólica (ISI).
3. No conserva el espectro de la señal transmitida.
4. Pueden resolverse las componentes del multitrayecto.

En la siguiente figura también se resumen las características que hemos enumerado anteriormente:

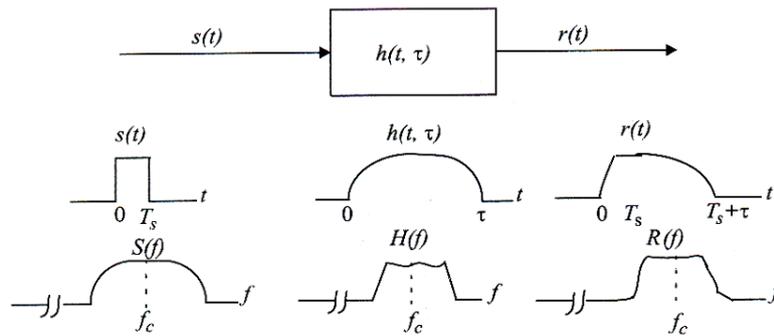


Figura 6: Características del canal de desvanecimiento selectivo en frecuencia

2.4. Efecto Doppler

El efecto Doppler se produce por el movimiento relativo del transmisor y del receptor. El efecto Doppler establece el cambio de frecuencia de un frente de ondas de acuerdo al movimiento relativo entre la fuente del frente de ondas y el observador. Este movimiento puede ser de la fuente, del observador o de los dos. Diríamos que el efecto Doppler asume la frecuencia de la fuente como una constante pero la señal recibida depende de las velocidades de la fuente y del observador, [3] y [4].

Cuando la velocidad del receptor es alta, si se encuentra en un tren o en un coche en movimiento rápido por ejemplo, el efecto Doppler será muy alto, por lo tanto, el receptor puede no ser capaz de detectar la señal transmitida.

La dispersión Doppler produce dispersión de frecuencia y desvanecimiento selectivo en tiempo.

Asociado a este efecto, tenemos el ancho de banda Doppler que se define en la siguiente expresión:

$$B_{\text{Doppler}} = \sqrt{\frac{\int_{-f_m}^{f_m} (f - f_c) S(f - f_c) df}{\int_{-f_m}^{f_m} S(f - f_c) df}}$$

Ecuación 12: Ancho de banda Doppler

siendo f_c , la frecuencia de portadora y $S(f)$ la densidad espectral de potencia de la señal de una portadora.

También definimos el tiempo de coherencia asociado al efecto Doppler:

$$T_c = \frac{1}{\max(f_{\text{Doppler}})} = \frac{1}{f_m} = \frac{\lambda}{v}$$

Ecuación 13: Tiempo de coherencia asociado al efecto Doppler

siendo v la velocidad y λ es la longitud de onda de la señal.

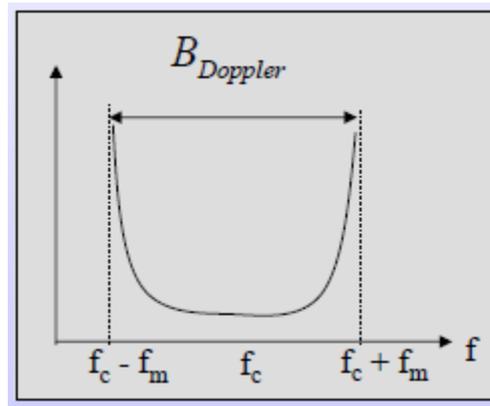


Figura 7: Espectro de un coeficiente de atenuación con un canal con Doppler

El efecto Doppler clasifica a los canales en canales de desvanecimiento rápido y canales de desvanecimiento lento.

2.4.1. Desvanecimiento rápido

Las principales características de los canales de desvanecimiento rápido son:

1. Alta dispersión Doppler
2. $\frac{1}{B_{\text{Doppler}}} \cong T_C < T_S$, siendo B_{Doppler} el ancho de banda Doppler, T_C el tiempo de coherencia y T_S el periodo de cada símbolo.

La siguiente figura muestra la respuesta de este tipo de canales:

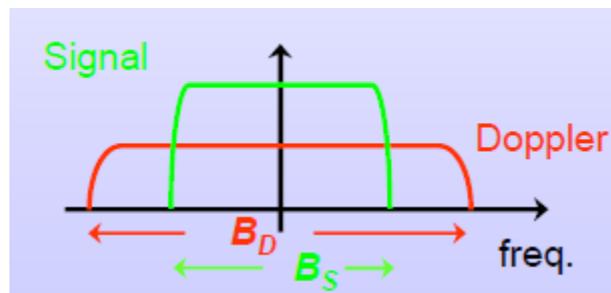


Figura 8: Canal de desvanecimiento rápido

2.4.2. Desvanecimiento lento

Las principales características de los canales de desvanecimiento lento son:

1. Baja dispersión Doppler.
2. $\frac{1}{B_{\text{Doppler}}} \cong T_C > T_S$, siendo B_{Doppler} el ancho de banda Doppler, T_C el tiempo de coherencia y T_S el periodo de cada símbolo.

La siguiente imagen muestra la respuesta de este tipo de canales:

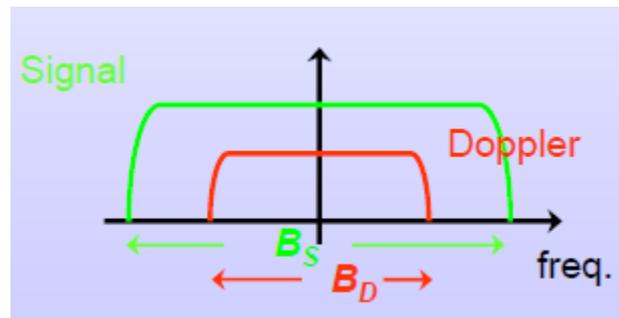


Figura 9: Canal de desvanecimiento lento



3. Sistemas MIMO en conformado de haz

La necesidad de mejorar las comunicaciones móviles, en términos de mayor velocidad de datos, disminución del número de llamadas caídas, calidad de servicio (QoS) y capacidades de red, ha llevado a los investigadores a buscar nuevos sistemas para mejorar las prestaciones de los sistemas de comunicaciones. El número de antenas del transmisor/receptor es uno de los parámetros que se ha analizado en los últimos estudios, [3].

Generalmente el diagrama de radiación de una antena con un único elemento es relativamente amplio y proporciona un valor bajo de ganancia así como de directividad. Para las comunicaciones de larga distancia es necesario diseñar una antena muy directiva. Esto puede conseguirse aumentando el tamaño eléctrico de la antena. Para ampliar las dimensiones de la antena, sin aumentar el tamaño de cada elemento, es posible unir varios elementos radiantes en una configuración geométrica y eléctrica. Los elementos a menudo son idénticos, que es más sencillo y más práctico.

Una generalización de la unión de varias antenas es el sistema MIMO (*multiple-input multiple-output*), que se refiere a un sistema que utiliza array de antenas en el lado del transmisor y en el del receptor. Este sistema promete una mejor eficacia espectral y una comunicación móvil más fiable.

En primer lugar haremos una descripción general de los sistemas MIMO, después hablaremos de la técnica de conformación de haz y por último analizaremos los sistemas MIMO en conformación de haz, una vez que tengamos una visión general.

3.1. Información general de los sistemas MIMO

Un sistema MIMO es un tipo de tecnología utilizada en redes móviles que se basa en la utilización de varias antenas en el transmisor y en el receptor, [1].

En los últimos años se ha comenzado a investigar y trabajar en este tipo de sistemas porque tienen mejoras respecto a los sistemas clásicos de transmisión en canales móviles. Esto se debe a que los canales móviles presentan un acusado desvanecimiento provocado por los distintos caminos que toma la señal enviada desde la antena transmisora. La señal llega al receptor con distintos ángulos, con diferentes retrasos temporales o a diferentes frecuencias debido a la dispersión de las ondas electromagnéticas del entorno en el que se desplace la señal. Dependiendo del entorno en el que enviemos la señal las dispersiones de las ondas serán mayores, por lo que los sistemas MIMO conseguirán paliar los efectos de la dispersión provocados por el entorno en el que nos situemos variando su configuración (antenas en el transmisor, antenas en el receptor, tipo de sistema MIMO, etc.).

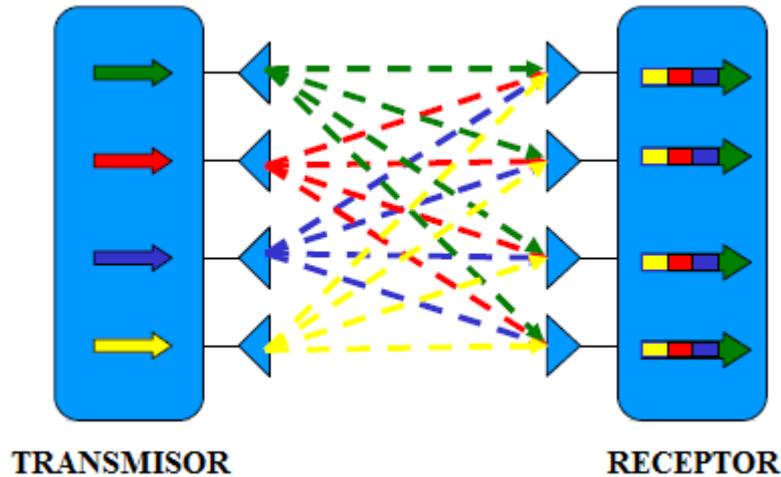


Figura 10: Representación de un sistema MIMO

En todo sistema de comunicaciones tenemos limitaciones de diseño respecto a la potencia recibida y al ancho de banda por lo que con los sistemas MIMO conseguiremos cumplir las especificaciones del sistema. Esto se debe a que las limitaciones de potencia y ancho de banda de los sistemas que utilizan sólo una antena en el transmisor y en el receptor no son tan críticos para los sistemas MIMO. Estos sistemas explotan la dimensión espacial incluyendo varias antenas tanto en el transmisor como en el receptor, [5].

3.2. Principales ventajas

Las principales ventajas de este tipo de sistema de comunicaciones móviles son la ganancia de array, la ganancia de diversidad espacial, la ganancia de multiplexación espacial y la reducción de la interferencia, [1]. Detallamos a continuación cada una de ellas:

- **Ganancia del array:** es el incremento de la SNR (relación señal a ruido) recibida que resulta de los efectos de la combinación coherente de la señal en el receptor. Esto se puede conseguirse mediante el procesamiento espacial de la señal en el receptor y/o el preprocesado de la señal en el array de antenas del transmisor. La ganancia del array mejora el ruido y la cobertura.
- **Ganancia de diversidad espacial:** la diversidad espacial mitiga el desvanecimiento provocado por las fluctuaciones de la señal en los sistemas móviles, con ello se provee al receptor de múltiples copias de la señal transmitida en el espacio, en la frecuencia o en el tiempo. Estas copias se suelen suponer independientes. Al enviar múltiples copias la probabilidad de que una de estas copias no sufra un desvanecimiento muy acusado aumenta, mejorando con ello la calidad de la señal en el

receptor. Un sistema MIMO con M antenas transmisoras y N antenas receptoras ofrece $M \times N$ enlaces independientes además de conseguir una diversidad espacial del orden $M \times N$.

- **Ganancia de multiplexación espacial:** los sistemas MIMO ofrecen un incremento lineal en la tasa de datos por medio de la multiplexación espacial. Bajo unas condiciones adecuadas del canal, así como entornos con dispersión, los receptores pueden separar los diferentes flujos de datos. Cada flujo de datos va a tener la misma calidad que el que experimentase un solo canal, pero a la salida podremos tener la capacidad que nos daba un solo flujo multiplicada por el número de flujos que hayamos implementado en el sistema MIMO. En general podremos decir que el número de flujos de datos soportados por un sistema MIMO será igual al mínimo del número de antenas transmisoras y el de antenas receptoras ($\min\{M, N\}$). Por tanto, la ganancia de multiplexación espacial incrementa la capacidad de las redes móviles.
- **Reducción de la interferencia:** las interferencias en las comunicaciones móviles se deben a que múltiples usuarios comparten los recursos de tiempo y frecuencia. En los sistemas MIMO se mitigan estos efectos incrementando la separación entre usuarios, ya que cuanto mayor separación haya entre ellos las interferencias serán menores. Por ejemplo, en presencia de interferencia, la ganancia de array incrementa la tolerancia al ruido así como la potencia mejorándose la relación señal a ruido interferencia (SINR). La reducción de la interferencia permite mejorar la cobertura en las redes móviles.

No es posible explotar simultáneamente todas las ventajas que nos proporcionan los sistemas MIMO debido al conflicto que se produce a la hora de disponer de los grados de libertad espacial del sistema. Sin embargo, cabe decir que realizando diversas combinaciones de las ventajas de este tipo de sistemas podemos mejorar la capacidad, la cobertura y la fiabilidad.

3.3. Conformación de haz

Una de las técnicas que utiliza varias antenas para la transmisión es la de conformación de haz.

La conformación de haz explota la ganancia de array, la ganancia por diversidad y podría reducir la interferencia.

Un vector forma el conjunto de los campos irradiados por cada uno de los elementos del array de antenas permitiendo obtener el campo total del array. Para obtener un patrón muy directivo, es necesario que el campo de los elementos del array

interfiera de manera constructiva en las direcciones deseadas y de manera destructiva en el espacio restante. Para conformar el patrón general de la antena, suponiendo un array de elementos idénticos, hay cinco formas que se pueden utilizar para conformar el patrón general del array, [6] y [7]. Éstas son:

1. La configuración geométrica del array de antenas (lineal, circular, rectangular, esféricas, etc.).
2. El espaciado entre elemento (distancia entre los diferentes elementos del array).
3. La amplitud de la excitación de los elementos individuales.
4. La fase de excitación de los elementos individuales.
5. El diagrama de radiación de los elementos individuales.

La forma más sencilla y más práctica de colocar los elementos de una array es en línea recta, con la misma separación entre los elementos y la misma amplitud de la excitación.

El principio de multiplicación de los patrones de radiación que caracterizan a los arrays de antenas se basa en el principio de superposición derivado de las ecuaciones de Maxwell.

En la siguiente imagen vemos la representación espacial de varias antenas que podrían formar un array de N elementos espaciados en los ejes X , Y y Z . Cada elemento está caracterizado por una alimentación I_N , una posición r_N y el diagrama de radiación de cada elemento.

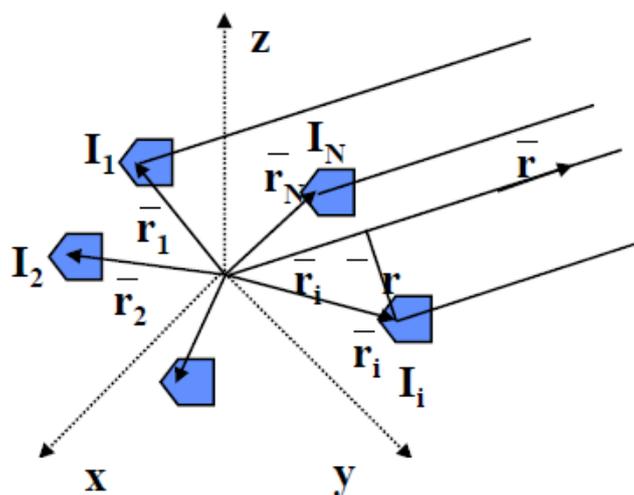
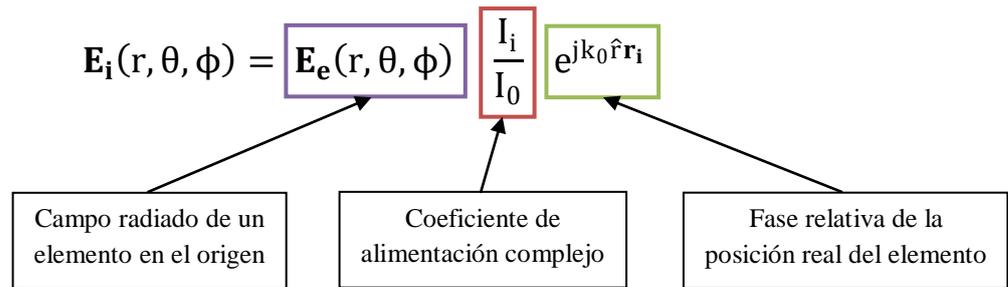


Figura 11: Representación espacial de varias antenas

El campo radiado por un elemento del array se define en la siguiente ecuación:

$$\mathbf{E}_i(r, \theta, \phi) = \mathbf{E}_e(r, \theta, \phi) \frac{I_i}{I_0} e^{jk_0 \hat{\mathbf{r}} \mathbf{r}_i}$$


Ecuación 14: Campo radiado por un elemento del array

siendo k_0 , el número de onda que depende de la longitud de onda.

Después de obtener el campo radiado por cada uno de los elementos, basándonos en el principio de superposición que hemos comentado anteriormente obtenemos el campo radiado por un array.

$$\mathbf{E}_{\text{array}}(r, \theta, \phi) = \sum_i \mathbf{E}_i = \mathbf{E}_e(r, \theta, \phi) \sum_i A_i e^{jk_0 \hat{\mathbf{r}} \mathbf{r}_i}$$

Ecuación 15: Campo radiado por un array

En la *Ecuación 15*, A_i denota el coeficiente de alimentación complejo de cada elemento. También podemos definir a partir de esta expresión el Factor de Array que es el producto del coeficiente de alimentación complejo de cada elemento y su fase relativa.

$$FA(\theta, \phi) = \sum_i A_i e^{jk_0 \hat{\mathbf{r}} \mathbf{r}_i}$$

Ecuación 16: Factor de array

Por tanto, podemos definir el campo radiado por una array como el producto del campo radiado por un elemento en el origen por el factor de array:

$$\mathbf{E}_{\text{array}}(r, \theta, \phi) = \mathbf{E}_e(r, \theta, \phi) FA(\theta, \phi)$$

Ecuación 17: Campo radiado por un array

El campo radiado como podemos analizar se expresa en función de la posición de cada elemento, de la excitación de cada elemento y de la frecuencia. Otras conclusiones que podemos obtener al respecto son:

- La polarización del campo total radiado depende sólo del elemento radiante usado (FA es un valor escalar).

- El factor de array permite analizar cómo es la influencia de la geometría y la ley de excitación en la radiación sin tener en cuenta qué tipo de elemento radiante utilizamos.
- En arrays grandes, $FA(\theta, \phi)$ varía más de lo que hace $\mathbf{E}_e(r, \theta, \phi)$, por lo que podemos aproximar el diagrama de radiación total como el factor de array.

3.3.1. Arrays lineales

El array de antenas que utilizaremos en el nuestro desarrollo será un array lineal de antenas equiespaciadas, por lo que vamos a estudiar este tipo de arrays.

Representamos un array de antenas de N elementos y desarrollamos el factor de array a partir de la *Ecuación 16*, y tomando como referencia la figura siguiente para situar el array de antenas espacialmente, [6] y [7].

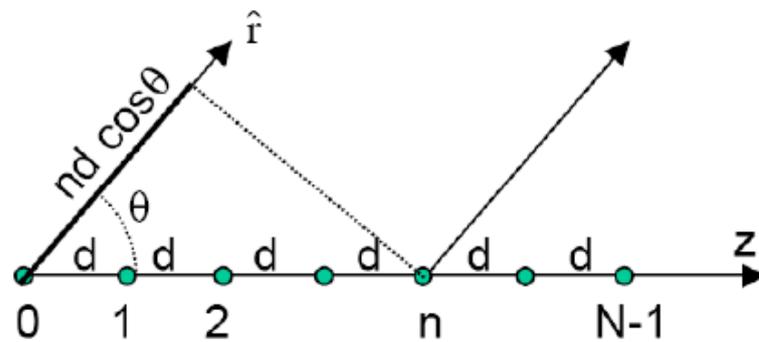


Figura 12: Representación esquemática de una array sobre el eje Z

$$FA(\theta, \phi) = \sum_n A_n e^{jk_0 \hat{\mathbf{r}} \cdot \mathbf{r}_n} \quad \text{siendo} \quad \begin{cases} A_n = a_n e^{jn\alpha} \\ \mathbf{r}_n = n \cdot d\hat{\mathbf{z}} \rightarrow \hat{\mathbf{r}} \cdot \mathbf{r}_n = nd\cos\theta \end{cases}$$

$$FA(\theta, \phi) = \sum_{n=0}^{N-1} A_n e^{jnk_0 d\cos\theta} = \sum_{n=0}^{N-1} a_n e^{jn(k_0 d\cos\theta + \alpha)} = \sum_{n=0}^{N-1} a_n e^{jn\psi}$$

$$\text{donde } \psi = k_0 d\cos\theta + \alpha$$

Ecuación 18: Desarrollo del factor de array



Del desarrollo de la expresión del factor de array podemos sacar cierta información que vamos a comentar:

- El factor de array es la transformada de Fourier de las corrientes A_n .
- Se puede establecer un paralelismo entre los conceptos de procesamiento de señal con los conceptos de arrays de antenas.
- Mientras que en procesamiento de señales pasamos de dominio de tiempo al espectro de frecuencias, en teoría de arrays pasamos del dominio espacial (Ley de excitación y posición) al espectro angular (diagrama de radiación).
- Algunas de las propiedades que obtenemos analizando la Transformada de Fourier las podemos aplicar para los arrays de antenas:
 - El factor de array es una función periódica, con periodo 2π , en la variable ψ .
 - Si el array es más largo (eléctricamente o en función de λ), el lóbulo principal del factor de array será más estrecho, lo mismo ocurrirá con la relación entre los pulsos estrechos y el espectro de frecuencias estrechas.
 - La ley de excitación dice que el decrecimiento irá del centro a los laterales siendo el nivel de radiación menor en los lóbulos laterales y presentando un lóbulo central más ancho en el diagrama de radiación del array.

Debemos analizar la fase del factor de array formada por la expresión de $\psi = k_0 d \cos\theta + \alpha$, donde α es la fase progresiva entre elementos.

La variable α juega un papel muy importante en la orientación de las antenas hacia los usuarios en un sistema MIMO en conformación de haz, por lo que vamos a ver algunas de sus características.

- La variable α permite ajustar la dirección del lóbulo principal de la matriz.
- La fase progresiva entre elementos, α , permiten compensar una dirección determinada del espacio, la diferencia de fase asociada a la propagación entre las ondas generadas por los diferentes elementos y el posicionamiento del máximo de radiación en esta dirección específica.

3.3.1.1. Arrays lineales y de amplitud uniforme

La alimentación de los diferentes elementos del array se puede variar. En nuestro estudio, hemos dejado la alimentación constante a 1 ($a_n=1$), por lo que analizaremos un array lineal de amplitud uniforme.

El factor de array de un array lineal y de amplitud uniforme se puede expresar como:

$$FA(\psi) = \sum_{n=0}^N e^{jn\psi} = \frac{e^{jN\psi} - 1}{e^{j\psi} - 1} = e^{j\frac{N-1}{2}\psi} \frac{\sin\left(\frac{N\psi}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\psi}{2}\right)}$$

Ecuación 19: Factor de array de un array lineal y de amplitud uniforme

Nos interesa ver en que direcciones radia el array y con qué intensidad, por lo que vamos a quedarnos con el módulo de la *Ecuación 19*.

$$|FA(\psi)| = \frac{1}{N} \left| \frac{\sin\left(\frac{N\psi}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\psi}{2}\right)} \right|$$

Ecuación 20: Módulo del Factor de array de un array lineal y de amplitud uniforme

La forma del diagrama de radiación en coordenadas cartesianas lo podemos ver en la siguiente figura (en esta figura k es k_0 definido con anterioridad).

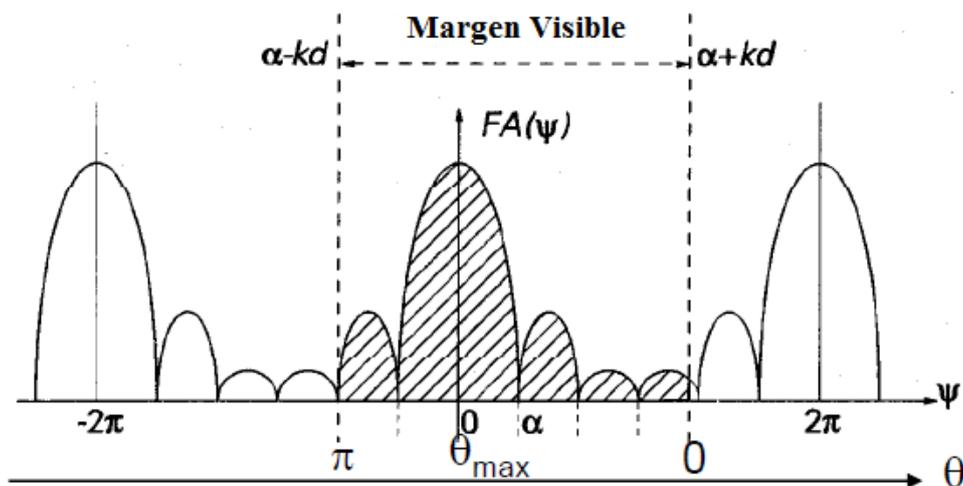


Figura 13: Diagrama de radiación

Observando la *Figura 13* podemos describir ciertas características que vienen resaltadas en ella:

- Margen visible: es el intervalo en el que θ pertenece al intervalo $[0, \pi]$. Su longitud es de $2k_0d$ y está centrado en $\psi = \alpha$. La parte del factor de

array comprendida dentro de este intervalo pertenece al diagrama de radiación en el espacio real.

$$\theta \in [0, \pi] \rightarrow \psi \in [-kd + \alpha, kd + \alpha]$$

- Periódica: ψ es periódica de periodo 2π .
- Máximo: en $\psi = 0$

$$\psi = k_0 d \cos \theta + \alpha = 0 \rightarrow \theta = \arccos\left(-\frac{\alpha}{k_0 d}\right)$$

- Nulos: en $\frac{2\pi}{N}$

Otras propiedades que podemos deducir de los array y que podemos generalizar para las antenas lineales equiespaciadas son:

- Si los coeficientes de excitación a_n (excepto la componente de fase progresiva) son reales y positivos, el máximo del factor de array está en $\psi=0$, puesto que entonces todos los fasores del sumatorio se suman sobre el eje real del plano complejo.
- Si los coeficientes son todos reales y positivos y el margen visible incluye $\psi=0$, el máximo se encuentra en la dirección $\theta_{\text{máx}} = \arccos(\alpha/k_0 d)$. Así, variando α , se consigue que el lóbulo principal explore el espacio. La exploración siempre conlleva un ensanchamiento del haz principal, proporcional a $\frac{1}{\text{sen}(\theta_{\text{máx}})}$.

Los arrays se dividen dependiendo de la dirección de apuntamiento en los siguientes tipos:

- **Array Broadside**: Tiene el máximo de radiación en la dirección transversal del plano del array ($\theta_{\text{máx}} = \frac{\pi}{2}$), donde $\alpha=0$ y el margen visible es $-k_0 d < \psi < k_0 d$.

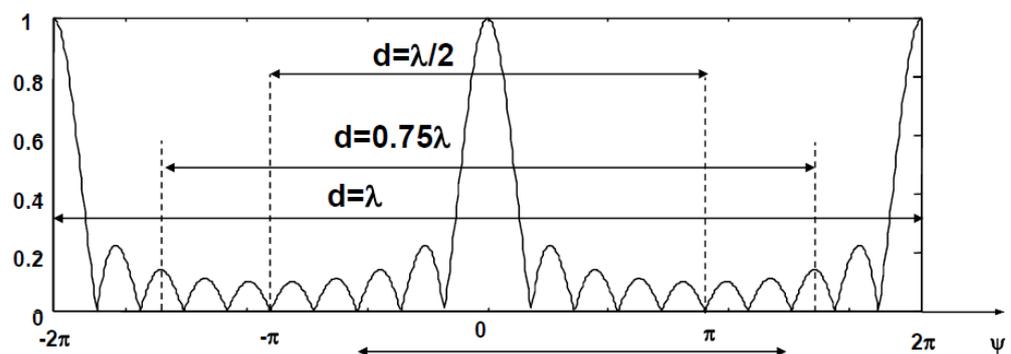


Figura 14: Diagrama de radiación de un array Broadside

- **Array de exploración:** Apunta a una dirección variable en la que α varía y $\theta_{\text{máx}}$ es fijo. El margen visible está comprendido para θ perteneciente al intervalo $[0, \pi] \rightarrow \psi \in [-k_0 d + \alpha, k_0 d + \alpha]$.

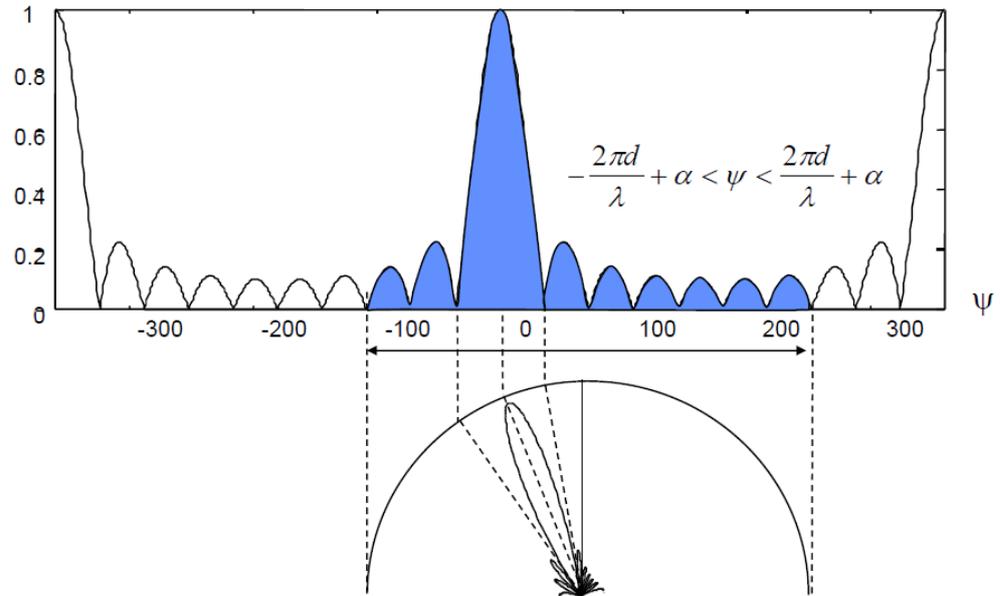


Figura 15: Diagrama de radiación de un array de exploración en cartesianas (arriba) y en polares (abajo)

- **Array Endfire:** Tiene el máximo de radiación en la dirección longitudinal del array, siendo $\theta_{\text{máx}} = 0$ ó π .
 - Para el caso en el que $\theta_{\text{máx}} = 0$, $\alpha = -k_0 d$ y el margen visible es $-2k_0 d < \psi < 0$. En este caso el diagrama de radiación es de tipo pincel con el mismo ancho de lóbulo en los dos planos principales.
 - Si las distancia entre elementos d y/o α son mayores que los valores determinados como $d > \lambda$, pueden aparecer los lóbulos de difracción o *grating lobes*, son similares a los lóbulos principales.

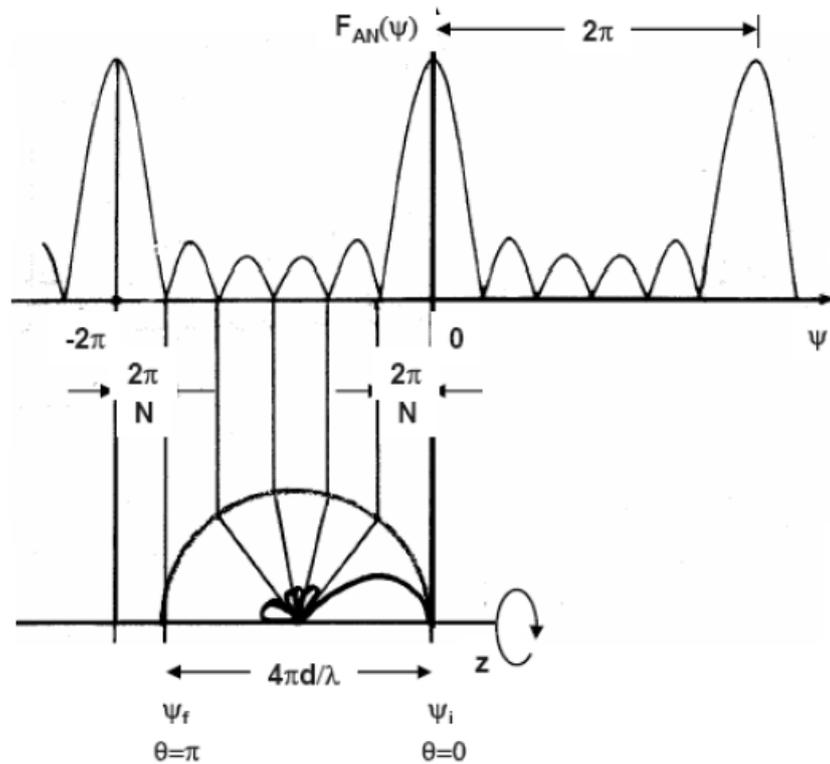


Figura 16: Diagrama de radiación de un array Endfire en cartesianas (arriba) y en polares (abajo)

3.4. MIMO en conformado de haz

En los últimos tiempos, ha crecido el interés en los sistemas de comunicaciones móviles basados en múltiples antenas. Se ha demostrado que utilizar múltiples antenas aumenta la capacidad de un enlace punto a punto cerca del $\min(M, N)$, siendo M el número de antenas transmisoras y N el número de antenas receptoras.

En este estudio, nos centraremos en el estudio de una sistema MIMO multiusuario en conformado de haz, lo que implica que jugaremos con las diferentes configuraciones de las antenas para conseguir unas óptimas prestaciones. La conformación de haz en los sistemas MIMO multiusuario se ha utilizado para reducir la interferencia del sistema, [8] y [9].

En general, las ventajas que nos aporta un sistema MIMO son los siguientes:

- Más fiabilidad del sistema al poder enviar la información desde múltiples antenas.
- La potencia transmitida se puede incrementar utilizando múltiples amplificadores de potencia.



- Es posibles aumentar la tasa de transmisión.
- Se pueden limitar las interferencias en el transmisor y en el receptor utilizando algunas técnicas.

Si nos centramos, en el sistema estudiado, las ventajas que nos aporta un sistema MIMO multiusuario utilizando la técnica de conformación de haz son:

- Mejora el rango de las tasas de datos existentes utilizando la técnica de conformación de haz en el transmisor y en el receptor.
- Reducción de las interferencias del transmisor y mejora de la tolerancia a interferencias del receptor.
- Mitiga las pérdidas por multitrayecto.

La eficacia espectral de los futuros sistemas de comunicaciones móviles se puede mejorar perceptiblemente utilizando estrategias multiantenas, que pueden explotar las características espaciales del canal de propagación. La dimensión espacial, que es proporcionada por el array de antenas, se puede considerar como un recurso adicional del sistema al lado de los recursos clásicos de ancho de banda y potencia.

El mayor o menor aumento de la ganancia es posible dependiendo del número de antenas del array y de su posición relativa en el espacio. Sin embargo, estos aumentos repercuten en el coste creciente de la complejidad del sistema, que hace que algunos órdenes de antena no sean realizables, por ejemplo para los terminales móviles baratos con capacidad limitada del tamaño y batería. Por esta razón, aunque esto sea una particularización, vamos a desplegar los arrays de antenas únicamente en las estaciones base (antenas transmisoras) y a los terminales sólo los equiparemos con una única antena, [10].

Para que el procesado de las antenas de la estación base sea coherente, los patrones de radiación que se formarán serán específicos para cada usuario. Si se dispone de la información del canal, el conformado de haz se podrá ajustar para controlar los cocientes individuales de la SINR de todos los usuarios. En principio, el conformado de haz se puede aplicar tanto al enlace ascendente como al descendente, no obstante hay algunas diferencias conceptuales que son:

- Enlace ascendente: para el cálculo de los pesos correspondientes a cada antena, se puede asumir que cada una es un receptor lineal multiusuario. De esta forma, para la optimización del conformado de haz de cada una de ellas, se pueden interpretar como independientes. En resumen, los pesos se pueden obtener por las descomposiciones independientes del valor propio. Tales técnicas han sido estudiadas extensamente en la literatura clásica del procesamiento de arrays. También, muchos de estos resultados se pueden encontrar en estudios sobre los sistemas de CDMA síncronos.

- Enlace descendente: es más complicado que el enlace ascendente, ya que el conformado de haz de todos los usuarios se debe optimizar de forma conjunta. Esto se debe a que estamos considerando un escenario en el que se permite la transmisión no ortogonal, de esta forma el conformado de haz implementado para cada usuario puede interferir en el resto. Por lo tanto, los valores de SINR dependerán en gran medida del conformado de haz diseñado para cada usuario del sistema.

La utilización del conformado de haz en sistemas MIMO multiusuario en el enlace descendente se ha estudiado menos debido a las complicaciones que hemos comentado, por lo que el estudio de este proyecto se centrará en el enlace descendente.

El esquema siguiente muestra un sistema MIMO multiusuario en conformado de haz en el enlace descendente, [11].

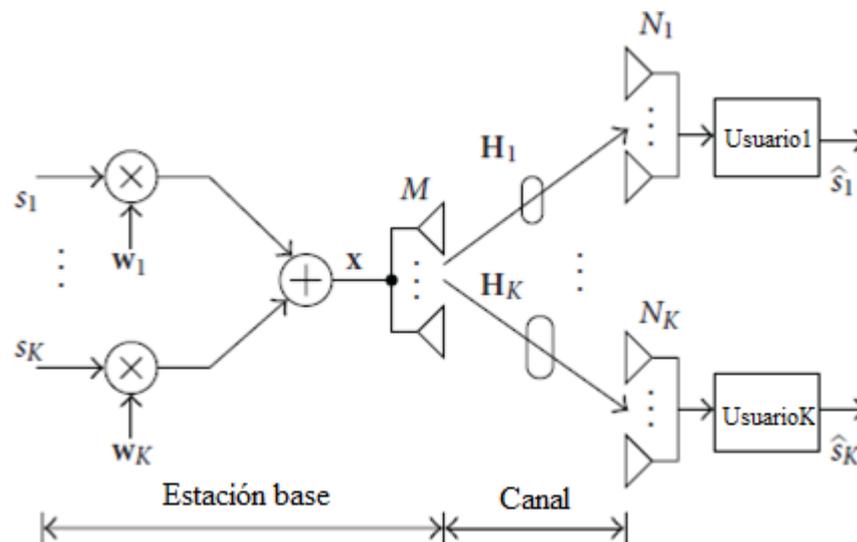


Figura 17: Sistema MIMO multiusuario en conformado de haz en el enlace descendente

En la figura anterior vemos como la estación base se comunica con varios usuarios utilizando el canal MIMO en conformado de haz, definido por la matriz H en las mismas ranuras de tiempo y frecuencia.

Consideramos que conocemos el ángulo de llegada para poder hacer el apuntamiento. La motivación de hacer esta suposición es que el conocimiento de información instantánea del canal puede estar disponible en la estación base sólo a través de la información que nos devuelvan los usuarios. Los inconvenientes del enfoque basado en la información que nos envíen de vuelta los usuarios son la reducción de la capacidad del sistema debido al uso frecuente del canal necesario para la transmisión de la información de los usuarios a la estación base, y también inherentes retrasos, errores y los costes adicionales asociados con a la información que nos envían los usuarios. Además, si el canal varía rápidamente, no es razonable suponer que los usuarios devuelvan la información instantáneamente a la estación base. Por tanto, suponemos que los usuarios no envían información sobre el canal a la estación base.



El desarrollo del sistema implementado lo detallaremos en el siguiente apartado, donde daremos cuenta con detalle del diseño de un sistema MIMO multiusuario en conformado de haz y del canal utilizado.

4. Modelado del sistema

El estudio que vamos a desarrollar versa sobre la conformación de haz en entornos MIMO multiusuario, es decir, utilizaremos un sistema de comunicaciones móviles en el que múltiples antenas emiten a múltiples usuarios intentando mejorar las prestaciones del sistema utilizando la técnica conocida como conformación de haz, variaremos el diagrama de radiación de las antenas para conseguir nuestros objetivos, [10].

Vamos a trabajar con tres tipos de escenarios dependiendo del número de usuarios (K) y del número de antenas transmisoras (M), éstas van a ser las variables de nuestro sistema, ya que el número de antenas en el receptor (N) lo dejaremos fijo a uno. Por tanto los posibles escenarios van a ser:

- $M < K \rightarrow$ Número de usuarios mayor que el número de antenas transmisoras en la estación base.
- $M = K \rightarrow$ Número de usuarios igual que el número de antenas transmisoras en la estación base.
- $M > K \rightarrow$ Número de usuarios menor que el número de antenas transmisoras en la estación base.

Este tipo de técnica la podemos utilizar tanto en el enlace ascendente como en el enlace descendente habiendo diferencias entre ambas:

- Enlace ascendente: para el cálculo de los pesos correspondientes a cada antena, se puede asumir que cada una es un receptor lineal multiusuario. De esta forma, para la optimización del conformado de haz de cada una de ellas, se pueden interpretar como independientes.
- Enlace descendente: es más complicado que el enlace ascendente, ya que el conformado de haz de todos los usuarios se debe optimizar de forma conjunta.

Este estudio se centrará en el enlace descendente, y las medidas que se tomarán para analizar las prestaciones del sistema serán la SINR (*Signal to interference plus noise ratio*) y la información mutua.

El esquema general de nuestro sistema lo podemos ver en la siguiente figura:

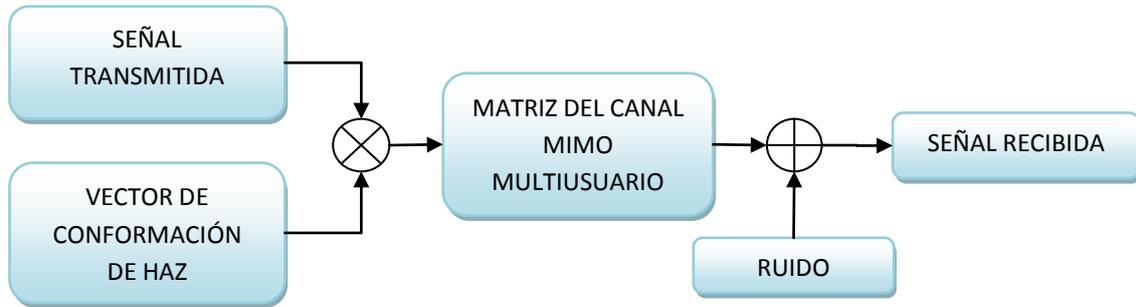


Figura 18: Esquema general del sistema

El funcionamiento general del sistema se puede resumir como: se crea una señal para transmitir a cada uno de los usuarios, en nuestro caso con modulación BPSK, se construye un vector de conformación de haz para cada uno de los usuarios teniendo en cuenta el número de antenas de nuestro array y la matriz de canal MIMO multiusuario, esto conforma la señal transmitida por el canal (teniendo en cuenta el tipo de canal por el que se transmite) y por último a esta señal le sumamos el ruido obteniendo la señal recibida.

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n}$$

Ecuación 21: Ecuación general del sistema

4.1. Notación

Para analizar detalladamente el sistema implementado vamos a utilizar una notación específica durante todo el desarrollo que será:

ABREVIATURA	DESCRIPCIÓN	DIMENSIONES
K	Número de usuarios	1x1
M	Número de antenas transmisoras	1x1
N	Número de antenas receptoras	1x1
\mathbf{H}	Matriz del canal MIMO multiusuario	$K \times M \times N$
\mathbf{U}	Matriz de conformación de haz	$M \times K$
\mathbf{s}	Señal de información transmitida	$K \times 1$
\mathbf{p}	Potencia de la señal de información	$K \times 1$
\mathbf{n} o σ^2	Ruido	$K \times 1$
\mathbf{R}	Matriz de covarianza	$M \times M$
\mathbf{y}	Señal recibida	$K \times 1$
SINR	Signal to interference plus noise ratio	$K \times 1$
IM	Información Mutua	1x1
d_T	Separación entre antenas transmisoras	1x1
λ	Longitud de onda	1x1
ASD	Ángulo de dispersión de las antenas transmisoras	1x1
ASA	Ángulo de dispersión de las antenas receptoras	1x1
θ_i	Ángulo entre la antena transmisora y un usuario	1x1

Tabla 1: Notación de señales, matrices y variables

4.2. Canal MIMO multiusuario

El canal MIMO multiusuario se va a modelar mediante una matriz \mathbf{H} cuyo elemento h_{mn} define la dispersión desde la m -ésima antena transmisora en la estación base a la n -ésima antena receptora. Para nuestro caso concreto, variaremos las antenas transmisoras (M) de 2 a 10 y sólo tendremos una antena receptora (N). En la definición del canal asumimos estacionariedad, dispersión plana del canal con correlación espacial, [12].

La matriz \mathbf{H} la definimos como:

$$\mathbf{H} = \mathbf{B}_N^* \mathbf{S} \mathbf{B}_M$$

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} e^{jk'_1 r'_1} & e^{jk'_2 r'_1} & \dots & e^{jk'_L r'_1} \\ e^{jk'_1 r'_2} & e^{jk'_2 r'_2} & \dots & e^{jk'_L r'_2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ e^{jk'_1 r'_N} & e^{jk'_2 r'_N} & \dots & e^{jk'_L r'_N} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} S(k'_1, k_1) & S(k'_1, k_2) & \dots & S(k'_1, k_L) \\ S(k'_2, k_1) & S(k'_2, k_2) & \dots & S(k'_2, k_L) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ S(k'_L, k_1) & S(k'_L, k_2) & \dots & S(k'_L, k_L) \end{bmatrix}$$

$$\times \begin{bmatrix} e^{-jk_1 r_1} & e^{-jk_2 r_1} & \dots & e^{-jk_L r_1} \\ e^{-jk_1 r_2} & e^{-jk_2 r_2} & \dots & e^{-jk_L r_2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ e^{-jk_1 r_N} & e^{-jk_2 r_N} & \dots & e^{-jk_L r_N} \end{bmatrix}$$

Ecuación 22: Matriz del canal MIMO multiusuario

Las matrices \mathbf{B}_N y \mathbf{B}_M describen la posición espacial de las antenas receptoras y transmisoras respectivamente $\{r'_1, r'_2, \dots, r'_N\}$ y $\{r_1, r_2, \dots, r_M\}$, la dirección de las ondas planas del receptor y del transmisor $\{k'_1, k'_2, \dots, k'_L\}$ y $\{k_1, k_2, \dots, k_L\}$ y la matriz \mathbf{S} describe la dispersión existente en el canal.

Más detalladamente, podemos decir que las matrices \mathbf{B}_N y \mathbf{B}_M con matrices rectangulares que dependen de la geometría de las antenas y \mathbf{S} es una matriz rectangular cuyos estadísticos se pueden modelar dependiendo de la características de la dispersión angular, es decir, si asumimos que las entradas al canal son Gaussianas complejas y que hay independencia en la dispersión, \mathbf{S} se puede caracterizar por la PAS (*power angular spread*). Teniendo en cuenta esto último, podemos caracterizar la matriz del canal \mathbf{H} como:

$$\mathbf{H} = \mathbf{B}_N^* \boldsymbol{\Sigma}_R^{\frac{1}{2}} \mathbf{G} \boldsymbol{\Sigma}_T^{\frac{1}{2}} \mathbf{B}_M$$

Ecuación 23: Matriz del canal simplificada

La matriz \mathbf{G} está formada por variables aleatorias Gaussianas complejas e independientes. Las matrices $\boldsymbol{\Sigma}_R^{\frac{1}{2}}$ y $\boldsymbol{\Sigma}_T^{\frac{1}{2}}$ son diagonales y deterministas y en su diagonal se encuentra el correspondiente PAS. Estas dos matrices se han modelado según una función Laplaciana teniendo en cuenta el ángulo que forma cada antena transmisora con el usuario correspondiente θ_i (consideraremos que la dispersión está presente en acimut

y que la dispersión en elevación es despreciable), el ASD para la matriz de transmisión y el ASA para la matriz de recepción.

A partir de las matrices definidas para formar el canal, podemos definir la matriz de covarianza \mathbf{R} en transmisión que nos servirá para calcular las prestaciones del sistema.

$$\mathbf{R} = \mathbf{B}_M^* \boldsymbol{\Sigma}_T \mathbf{B}_M$$

Ecuación 24: Matriz de covarianza en transmisión

La matriz del canal será diferente para cada uno de los usuarios del sistema, así como también cambiará dependiendo del número de antenas transmisoras, por tanto, las variables que cambiarán la matriz \mathbf{H} , serán:

- El número de usuarios K , ya que dependiendo del número de usuarios, el apuntamiento de las antenas variará, haciendo que el ángulo de dispersión acimutal varíe. En nuestro estudio, consideraremos los casos en los que haya 3 o 5 usuarios, por tanto, los ángulos correspondientes a cada usuarios serán:

$$K = 3 \rightarrow \begin{cases} \theta_{\text{usuario 1}} = 45^\circ \\ \theta_{\text{usuario 2}} = 0^\circ \\ \theta_{\text{usuario 3}} = -45^\circ \end{cases}$$

$$K = 5 \rightarrow \begin{cases} \theta_{\text{usuario 1}} = 60^\circ \\ \theta_{\text{usuario 2}} = 30^\circ \\ \theta_{\text{usuario 3}} = 0^\circ \\ \theta_{\text{usuario 4}} = -30^\circ \\ \theta_{\text{usuario 5}} = -60^\circ \end{cases}$$

- La ASD tomará dos valores distintos 360° y 20° . De este modo podremos analizar el efecto del ángulo de dispersión en las prestaciones del sistema.
- El número de antenas transmisoras M .

En la siguiente imagen podemos ver el escenario del sistema teniendo en cuenta el ángulo θ_i .

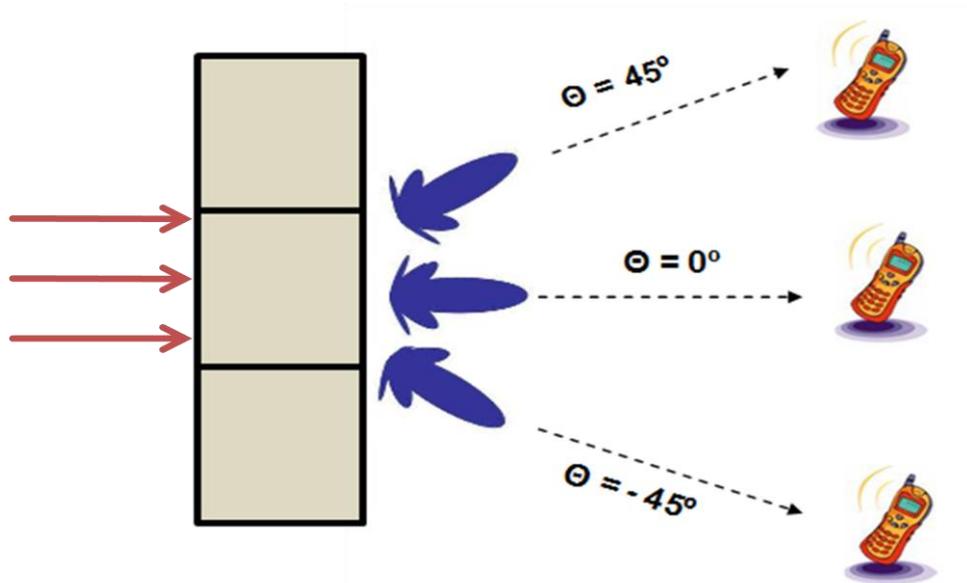


Figura 19: Escenario del sistema teniendo en cuenta el ángulo θ

La Figura 19 muestra tres antenas a las que se le introduce la señal que queremos enviar a los tres usuarios. Vemos los ángulos con que emite la antena del medio apuntando a cada uno de los usuarios del sistema, haciendo uso de la técnica de conformado de haz, por tanto este sistema lo definiríamos como $M=3$ (3 antenas transmisoras), $K=3$ (3 usuarios) y $N=1$ (cada usuario tiene en recepción una antena receptora).

4.3. Señal de entrada

La señal de entrada al sistema estará compuesta por dos señales, una de ellas será la señal de información para cada uno de los usuarios (s_k) y la otra los vectores de conformación de haz (\mathbf{u}_k). En los siguientes puntos se definirán las señales descritas.

La señal de entrada se definirá como:

$$\mathbf{x} = \sum_{k=1}^K \mathbf{u}_k s_k$$

Ecuación 25: Señal de entrada

4.3.1. Señal de información

Es la señal de información que va destinada a cada uno de los K usuarios, por tanto es la señal a transmitir. La modulación de dicha señal será BPSK.

$$\mathbf{s} = \begin{bmatrix} s_1 \\ \vdots \\ s_K \end{bmatrix}$$

Ecuación 26: Señal de información

La potencia de la señal de información para el usuario i la calcularemos como la media de la señal multiplicada por su conjugado, estas señales estarán normalizadas, por lo que la potencia de la señal será igual a uno:

$$p_i = \varepsilon\{|s_i(t)|^2\} = 1$$

Ecuación 27: Potencia de la señal de información

4.3.2. Matriz de conformación de haz

La matriz de conformación de haz nos permite introducir la estrategia de conformación de haz en nuestro modelo además del diagrama de radiación de las antenas. Al introducir esta técnica lo que queremos conseguir es que las antenas apunten hacia cada uno de los usuarios consiguiendo que les llegue la mayor potencia posible.

La matriz estará compuesta por K vectores, dependiendo del número de usuarios del sistema.

$$\mathbf{U} = [\mathbf{u}_1 \quad \cdots \quad \mathbf{u}_K]$$

Ecuación 28: Matriz de conformación de haz

Los vectores de conformación de haz dependen del número de antenas del transmisor (M), de la distancia entre las antenas transmisoras (d_T), de la longitud de onda (λ) y del ángulo que forman las antenas con los usuarios (θ). Dicho vector debe estar normalizado $\|\mathbf{u}_i\|_2 = 1$.

$$\mathbf{u}_i = \begin{bmatrix} u_{i1} \\ u_{i2} \\ \vdots \\ u_{iM} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{M}} \times \begin{bmatrix} 1 \\ e^{j\alpha} \\ \vdots \\ e^{j(M-1)\alpha} \end{bmatrix}$$

$$\text{siendo } \alpha = -\frac{2\pi}{\lambda} d_T \sin \theta_i$$

Ecuación 29: Vector de conformación de haz del usuario i

4.4. Cálculo de prestaciones

Para caracterizar el funcionamiento del sistema implementado vamos a calcular la SINR y la información mutua. Con estos cálculos podremos analizar el comportamiento de nuestro sistema.

Lo interesante en nuestro sistema será comparar para cada uno de los usuarios como varían la SINR y la información mutua a medida que aumentamos el número de antenas en el transmisor, así como influye la colocación de los usuarios respecto a las antenas de la estación base, el ángulo de dispersión ASD que tengamos y el ruido.

Las prestaciones del sistema las mediremos como comentamos anteriormente en el enlace descendente.

4.4.1. SINR

La SINR nos mide la relación entre la señal y el ruido y la interferencia, con ello podremos valorar si a los usuarios les llega la suficiente potencia de señal para poder realizar la comunicación o si bien el canal distorsiona la señal demasiado impidiendo que la comunicación sea viable.

La expresión que analizaremos será la del enlace descendente no siendo válida dicha expresión para el enlace ascendente, [10].

La formulación de la SINR del usuario i , siendo i uno de los K usuarios que hay en el escenario de nuestro sistema es la siguiente:

$$\text{SINR}_i^{\text{DL}}(\mathbf{U}, \mathbf{p}) = \frac{p_i \mathbf{u}_i \mathbf{R}_i \mathbf{u}_i^H}{\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^K p_k \mathbf{u}_k \mathbf{R}_i \mathbf{u}_k^H + \sigma_i^2}$$

Ecuación 30: SINR enlace descendente

siendo \mathbf{R}_i , la matriz de correlación para el usuario i .

Analizando la ecuación anterior, vemos que en el numerador encontramos la señal que llega al usuario i y en el denominador la suma de la interferencia del resto de los usuarios que influye en i y el ruido del sistema.

La matriz de covarianza que utilizaremos es aquella que generamos a través de la matriz del canal \mathbf{H} como explicamos al definir el canal, el resto de los términos que influyen son los vectores de conformación de haz de cada usuario y la potencia de la señal de información.

Queda patente que al introducir los vectores de conformación de haz (\mathbf{u}_k) en el cálculo de la SINR estamos introduciendo los diagramas de radiación de las antenas y así podremos ver cómo influye el apuntamiento de las antenas en el resultado final.

4.4.2. Información mutua

La información mutua nos da otro índice para analizar las prestaciones del sistema. Dependerá de la relación entre señal y ruido e interferencia. De forma genérica podemos definir la información mutua:

$$IM = \log_2 \left(\frac{P_S + P_I + P_N}{P_I + P_N} \right) = \log_2 \left(1 + \frac{P_S}{P_I + P_N} \right)$$

Ecuación 31: Expresión genérica de la información mutua

En la expresión anterior P_S es la potencia de señal, P_I la interferencia que causan los usuarios al usuario que está siendo analizado y P_N el ruido del sistema.

El desarrollo de la información mutua para el usuario i la describimos a continuación:

- Señal de entrada

$$\mathbf{x} = \sum_{k=1}^K \mathbf{w}_k s_k$$

$$\text{siendo } \mathbf{w}_k = \sqrt{p_k} \mathbf{u}_k$$

Ecuación 32: Señal de entrada para el cálculo de la información mutua

- Señal de salida para el usuario i

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n}$$

$$y_i = \sum_{j=1}^K \mathbf{h}_i^T \sqrt{p_j} \mathbf{u}_j s_j + n_i$$

Ecuación 33: Señal de salida para el usuario i para el cálculo de la información mutua

Si desarrollamos la *Ecuación 33* podremos ver los términos que nos interesan, es decir, S, I y N. Para verlo con más claridad, de ahora en adelante desarrollaremos la expresión de la información mutua para tres usuarios, exponiendo la ecuación para usuario 1.

$$y_1 = \underbrace{\mathbf{h}_1^T \sqrt{p_1} \mathbf{u}_1 s_1}_S + \underbrace{\mathbf{h}_1^T \sqrt{p_2} \mathbf{u}_2 s_2 + \mathbf{h}_1^T \sqrt{p_3} \mathbf{u}_3 s_3}_I + \underbrace{n_1}_n$$

\mathbf{n}'

Ecuación 34: Desarrollo señal de salida para el usuario 1

- Covarianza de la señal de salida

La covarianza la calculamos como la esperanza de la señal de salida multiplicada por ella misma conjugada. Desarrollaremos dicha expresión:

$$\begin{aligned}
 R_{y_1} &= E\{y_1 y_1^*\} \\
 &= E\{ \mathbf{h}_1^T \sqrt{p_1} \mathbf{u}_1 s_1 s_1^* \sqrt{p_1} \mathbf{u}_1^H \mathbf{h}_1^* + \mathbf{h}_1^T \sqrt{p_1} \mathbf{u}_1 s_1 s_2^* \sqrt{p_2} \mathbf{u}_2^H \mathbf{h}_1^* \\
 &\quad + \mathbf{h}_1^T \sqrt{p_1} \mathbf{u}_1 s_1 s_3^* \sqrt{p_3} \mathbf{u}_3^H \mathbf{h}_1^* + \mathbf{h}_1^T \sqrt{p_1} \mathbf{u}_1 s_1 n_1^* \\
 &\quad + \mathbf{h}_1^T \sqrt{p_2} \mathbf{u}_2 s_2 s_1^* \sqrt{p_1} \mathbf{u}_1^H \mathbf{h}_1^* + \mathbf{h}_1^T \sqrt{p_2} \mathbf{u}_2 s_2 s_2^* \sqrt{p_2} \mathbf{u}_2^H \mathbf{h}_1^* \\
 &\quad + \mathbf{h}_2^T \sqrt{p_2} \mathbf{u}_2 s_2 s_3^* \sqrt{p_3} \mathbf{u}_3^H \mathbf{h}_1^* + \mathbf{h}_1^T \sqrt{p_2} \mathbf{u}_2 s_2 n_1^* \\
 &\quad + \mathbf{h}_1^T \sqrt{p_3} \mathbf{u}_3 s_3 s_1^* \sqrt{p_1} \mathbf{u}_1^H \mathbf{h}_1^* + \mathbf{h}_1^T \sqrt{p_3} \mathbf{u}_3 s_3 s_2^* \sqrt{p_2} \mathbf{u}_2^H \mathbf{h}_1^* \\
 &\quad + \mathbf{h}_1^T \sqrt{p_3} \mathbf{u}_3 s_3 s_3^* \sqrt{p_3} \mathbf{u}_3^H \mathbf{h}_1^* + \mathbf{h}_1^T \sqrt{p_3} \mathbf{u}_3 s_3 n_1^* + n_1 n_1^* \}
 \end{aligned}$$

La expresión queda:

$$\begin{aligned}
 R_{y_1} &= E\{y_1 y_1^*\} \\
 &= \mathbf{h}_1^T \sqrt{p_1} \mathbf{u}_1 E\{s_1 s_1^*\} \sqrt{p_1} \mathbf{u}_1^H \mathbf{h}_1^* + \mathbf{h}_1^T \sqrt{p_1} \mathbf{u}_1 E\{s_1 s_2^*\} \sqrt{p_2} \mathbf{u}_2^H \mathbf{h}_1^* \\
 &\quad + \mathbf{h}_1^T \sqrt{p_1} \mathbf{u}_1 E\{s_1 s_3^*\} \sqrt{p_3} \mathbf{u}_3^H \mathbf{h}_1^* + \mathbf{h}_1^T \sqrt{p_1} \mathbf{u}_1 E\{s_1 n_1^*\} \\
 &\quad + \mathbf{h}_1^T \sqrt{p_2} \mathbf{u}_2 E\{s_2 s_1^*\} \sqrt{p_1} \mathbf{u}_1^H \mathbf{h}_1^* + \mathbf{h}_1^T \sqrt{p_2} \mathbf{u}_2 E\{s_2 s_2^*\} \sqrt{p_2} \mathbf{u}_2^H \mathbf{h}_1^* \\
 &\quad + \mathbf{h}_2^T \sqrt{p_2} \mathbf{u}_2 E\{s_2 s_3^*\} \sqrt{p_3} \mathbf{u}_3^H \mathbf{h}_1^* + \mathbf{h}_1^T \sqrt{p_2} \mathbf{u}_2 E\{s_2 n_1^*\} \\
 &\quad + \mathbf{h}_1^T \sqrt{p_3} \mathbf{u}_3 E\{s_3 s_1^*\} \sqrt{p_1} \mathbf{u}_1^H \mathbf{h}_1^* + \mathbf{h}_1^T \sqrt{p_3} \mathbf{u}_3 E\{s_3 s_2^*\} \sqrt{p_2} \mathbf{u}_2^H \mathbf{h}_1^* \\
 &\quad + \mathbf{h}_1^T \sqrt{p_3} \mathbf{u}_3 E\{s_3 s_3^*\} \sqrt{p_3} \mathbf{u}_3^H \mathbf{h}_1^* + \mathbf{h}_1^T \sqrt{p_3} \mathbf{u}_3 E\{s_3 n_1^*\} + E\{n_1 n_1^*\}
 \end{aligned}$$

Ecuación 35: Matriz de covarianza completa del usuario 1

Las señales de cada uno de los usuarios son independientes entre sí e independientes del ruido, por lo que la media de los términos cruzados será nula simplificándose la expresión.

$$R_{y_1} = p_1 \mathbf{h}_1^T \mathbf{u}_1 \mathbf{u}_1^H \mathbf{h}_1^* + p_2 \mathbf{h}_1^T \mathbf{u}_2 \mathbf{u}_2^H \mathbf{h}_1^* + p_3 \mathbf{h}_1^T \mathbf{u}_3 \mathbf{u}_3^H \mathbf{h}_1^* + \sigma^2$$

Ecuación 36: Matriz de covarianza simplificada del usuario 1

- Covarianza de la señal interferente y el ruido

La señal interferente más el ruido la denotamos como n' ($I+n$), la expresión simplificada siguiendo el mismo procedimiento que en el cálculo de la covarianza de la señal de salida será:

$$R_{n_1'} = E\{n_1 n_1'^*\} = p_2 \mathbf{h}_1^T \mathbf{u}_2 \mathbf{u}_2^H \mathbf{h}_1^* + p_3 \mathbf{h}_1^T \mathbf{u}_3 \mathbf{u}_3^H \mathbf{h}_1^* + \sigma^2$$

Ecuación 37: Matriz de covarianza de la interferencia y el ruido

- Información mutua

A partir de la covarianza de la señal de salida y de la covarianza de la interferencia más el ruido podemos calcular la información mutua del sistema.

$$IM = \log_2 \left(\frac{R_y}{R_{n'}} \right)$$

Ecuación 38: Información mutua

Aplicando dicha expresión para el análisis que estamos realizando, es decir, nuestro sistema tiene 3 usuarios ($K=3$) y hallando las expresiones para el usuario 1, la información mutua para el usuario 1 nos queda:

$$IM = \log_2 \left(\frac{R_{y1}}{R_{n1'}} \right) = \log_2 \left(\frac{p_1 \mathbf{h}_1^T \mathbf{u}_1 \mathbf{u}_1^H \mathbf{h}_1^* + p_2 \mathbf{h}_1^T \mathbf{u}_2 \mathbf{u}_2^H \mathbf{h}_1^* + p_3 \mathbf{h}_1^T \mathbf{u}_3 \mathbf{u}_3^H \mathbf{h}_1^* + \sigma^2}{p_2 \mathbf{h}_1^T \mathbf{u}_2 \mathbf{u}_2^H \mathbf{h}_1^* + p_3 \mathbf{h}_1^T \mathbf{u}_3 \mathbf{u}_3^H \mathbf{h}_1^* + \sigma^2} \right) =$$
$$\log_2 \left(1 + \frac{p_1 \mathbf{h}_1^T \mathbf{u}_1 \mathbf{u}_1^H \mathbf{h}_1^*}{p_2 \mathbf{h}_1^T \mathbf{u}_2 \mathbf{u}_2^H \mathbf{h}_1^* + p_3 \mathbf{h}_1^T \mathbf{u}_3 \mathbf{u}_3^H \mathbf{h}_1^* + \sigma^2} \right)$$

Ecuación 39: Información mutua para el usuario 1

5. Resultados del proyecto

El estudio teórico que hemos desarrollado en los anteriores apartados, tanto en la exposición teórica del sistema que vamos a desarrollar como las expresiones matemáticas utilizadas para representar el sistema se materializan en los resultados que se van a exponer a lo largo de este capítulo.

5.1. Escenario de la simulación

El estudio un sistema MIMO multiusuario en conformación de haz se simulará utilizando la herramienta informática MATLAB®.

El desarrollo de este sistema ha seguido una serie de pasos, es decir, se ha ido formando el sistema y una vez diseñado se han tomado las medidas para analizar las prestaciones del mismo. Los pasos han sido:

1. Análisis de las variables del sistema.
 - a. Número de antenas en transmisión $M=[2, 10]$.
 - b. Número de antenas en recepción $N=1$.
 - c. Número de usuarios $K=3$ y 5 .
 - d. Ángulos que forman las antenas transmisoras con los usuarios (θ):
 - $K=3 \rightarrow \theta = 45^\circ, 0^\circ$ y -45° .
 - $K=5 \rightarrow \theta = 60^\circ, 30^\circ, 0^\circ, -30^\circ, -60^\circ$.
 - e. Ángulo de dispersión de las antenas transmisoras $ASD=360^\circ$ y 20° .
 - f. Ángulo de dispersión de las antenas receptoras $ASA=360^\circ$.
 - g. Separación de las antenas transmisoras.
 - h. Separación de las antenas receptoras.
 - i. Señal transmitida: BPSK.
 - j. Ruido del sistema (en ausencia y en presencia de ruido).
2. Diseño del canal MIMO multiusuario en conformado de haz.
3. Generación de las matrices del canal.
4. Generación de la matriz de conformación de haz.
5. Medida de prestaciones del sistema.
 - a. SINR.
 - b. Información mutua.



Para obtener un resultado lo más general posible en la medida en que nos lo puede permitir una simulación, hemos simulado 1000 realizaciones. Las matrices del canal están compuestas por 1000 muestras con lo que de esta forma conseguimos tener una cantidad significativa de muestras. Este número se ha considerado óptimo, ya que el cálculo de estas matrices conlleva un alto cargo computacional lo que limita las muestras que podemos obtener del canal.

El número de antenas en transmisión y el número de usuarios se han elegido de esta manera debido a que con esto conseguimos mostrar dos escenarios distintos que pueden representar al sistema. La disposición de los usuarios respecto a las antenas transmisoras se debe a la repartición de los usuarios de manera equiespaciada.

Otro punto importante de este estudio radica en la comparación del sistema respecto al ángulo de dispersión de las antenas transmisoras, eligiendo un ángulo para el que la potencia llega a las antenas por todas las direcciones ($ASD=360^\circ$) y otro en el que dicho ángulo sea muy pequeño ($ASD=20^\circ$). Podremos analizar el comportamiento de nuestro sistema para estos dos ángulos.

5.2. Resultados

Como hemos comentado anteriormente, las prestaciones del sistema que vamos a analizar son la SINR y la información mutua.

El primer estudio que haremos para cada una será para tres usuarios y posteriormente para 5. Para cada uno de los usuarios analizaremos la influencia del ASD y del ruido, analizando los cuatro casos que se pueden dar.

Para analizar los resultados, es de vital importancia analizar como es el diagrama de radiación de las antenas para el número de usuarios del sistema y el número de antenas transmisoras. Esto se debe a que el estudio del sistema se basa en la conformación de haz de las antenas transmisoras por lo que no cabe duda que es importante analizar cómo están transmitiendo las antenas de nuestro sistema en los escenarios diseñados.

5.2.1. Diagramas de radiación

En esta sección analizaremos los diagramas de radiación de las antenas transmisoras.

A lo largo del estudio que hemos realizado hemos variado el número de antenas que se encuentran en la estación base (M) desde 2 hasta 10 antenas por estación base. Además otra variable de nuestro sistema ha sido el número de usuarios (K) que ha sido de 3 o de 5 usuarios. Con estos datos vamos a analizar los diferentes diagramas de radiación de nuestras antenas variando las dos variables mencionadas, K y M.

Este análisis es importante para poder entender el comportamiento del sistema, es decir, para analizar las prestaciones del mismo.

5.2.1.1. $K=3$

Nuestro sistema está compuesto por tres usuarios que se sitúan a distinto ángulo respecto al array de antenas. El usuario 1 está situado en 45° , el usuario 2 en 0° y el usuario 3 en -45° .

5.2.1.1.1. $M=2$

El diagrama de radiación representado corresponde a un sistema formado por un array lineal y uniforme de dos antenas. La figura muestra tres diagramas de radiación, cada uno de ellos corresponde a la radiación que emite el conjunto de las dos antenas apuntando cada uno hacia el ángulo en el que se encuentra cada uno de los usuarios.

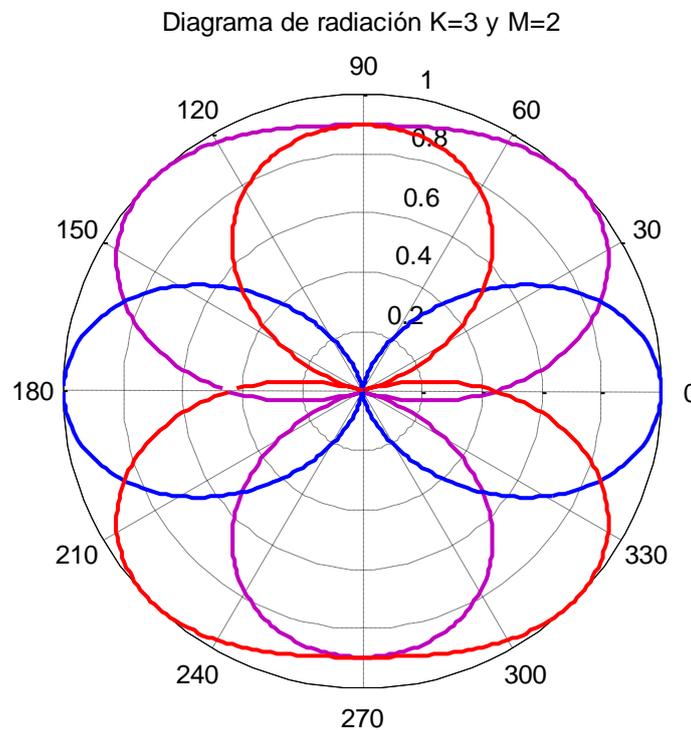


Figura 20: Diagrama de radiación de 3 usuarios y 2 antenas

En la siguiente tabla se muestra el valor del diagrama de radiación normalizado para cada uno de los usuarios respecto al ángulo al que están apuntando las antenas transmisoras.

K=3 y M=2				
		DR(θ) Normalizado		
		Usuario 1	Usuario 2	Usuario 3
θ	45°	1	0.444	0.6057
	0°	0.444	1	0.444
	-45°	0.6057	0.444	1

Tabla 2: Valores significativos del diagrama de radiación de 3 usuarios y 2 antenas

En nuestro estudio es importante ver cuál es la intensidad del campo que le llega a cada uno de los usuarios cuando las antenas están apuntando hacia un usuario en concreto tanto como las posibles interferencias que se puedan producir entre los usuarios. Cada usuario recibirá una intensidad de campo diferente dependiendo del apuntamiento de las antenas, por tanto, un usuario recibirá una intensidad de campo mayor cuando las antenas apunten hacia él y los otros dos recibirán una intensidad menor.

Centrándonos en el diagrama de radiación que estamos analizando podemos observar:

- **Diagrama de radiación del usuario 1 (morado):** Está compuesto por tres lóbulos principales, dos de ellos están unidos. La anchura de los lóbulos produce dicha unión. El lóbulo que se encuentra en el semiplano inferior es de menor intensidad que los dos anteriores. El lóbulo que apunta hacia 45° donde está situado el usuario 1 tiene en ese ángulo su mayor intensidad. El usuario 2 que se sitúa en 0° también recibe la influencia de este lóbulo pero con menor intensidad, ya que está en un punto en que el lóbulo está creciendo. El usuario 3 situado en -45° se ve afectado por otro lóbulo diferente, el menor de los tres, en ese punto este lóbulo está creciendo, por lo que no se encuentra en una zona de mucha intensidad.
- **Diagrama de radiación del usuario 2 (azul):** Está compuesto por dos lóbulos principales iguales. El mismo lóbulo apunta hacia los tres usuarios pero la mayor intensidad la recibe el usuario 2 situado en 0°. Los usuarios 1 y 3 al estar situados como en espejo respecto al usuario 2 reciben la misma intensidad pero menor que el usuario 2 debido a que en estos puntos el lóbulo está en zona de crecimiento/decrecimiento.
- **Diagrama de radiación del usuario 3 (rojo):** Es el dual al diagrama de radiación del usuario 1. Los dos lóbulos que están unidos se encuentran en la mitad inferior del diagrama polar y el que es un poco menor se encuentra en la mitad superior al contrario del diagrama de radiación del



usuario 1. El análisis por tanto es equivalente cambiando el usuario 1 por el 3, ya que el usuario 2 tiene la misma influencia.

El diagrama de radiación formado por dos antenas es muy poco directivo, los lóbulos del diagrama de radiación de cada uno de los usuarios son muy anchos. Esto provoca que las interferencias sean muy altas. La mayor interferencia la produce el usuario 1 sobre el usuario 3 y viceversa.

5.2.1.1.2. $M=3$

El diagrama de radiación representado corresponde a un sistema formado por un array lineal y uniforme de tres antenas. La figura muestra tres diagramas de radiación, cada uno de ellos corresponde a la radiación que emite el conjunto de las tres antenas apuntando cada uno hacia el ángulo en el que se encuentra cada uno de los usuarios.

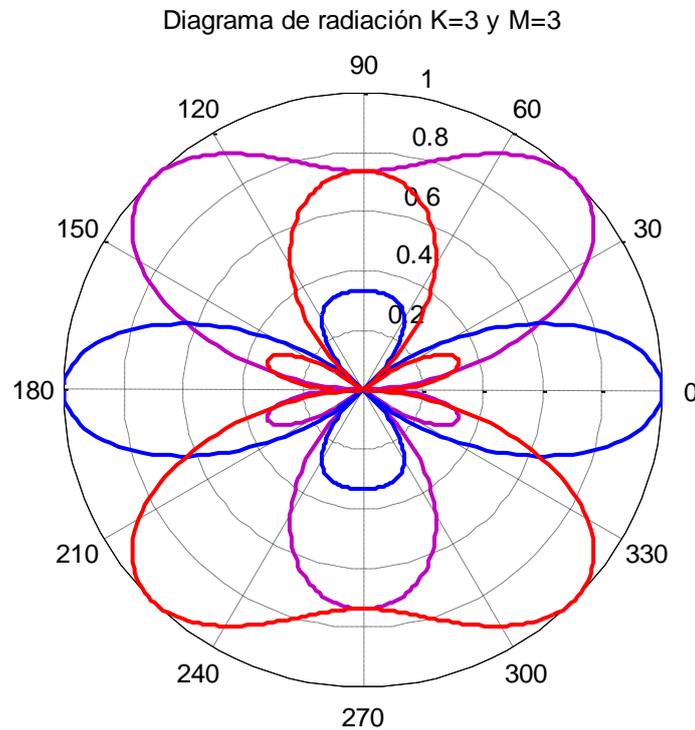


Figura 21: Diagrama de radiación de 3 usuarios y 3 antenas

En la siguiente tabla se muestra el valor del diagrama de radiación normalizado para cada uno de los usuarios respecto al ángulo al que están apuntando las antenas transmisoras.

$K=3$ y $M=3$				
		DR(θ) Normalizado		
		Usuario 1	Usuario 2	Usuario 3
θ	45°	1	0.0705	0.1558
	0°	0.0705	1	0.0705
	-45°	0.1558	0.0705	1

Tabla 3: Valores significativos del diagrama de radiación de 3 usuarios y 3 antenas

Centrándonos en el diagrama de radiación que estamos analizando podemos observar:

- **Diagrama de radiación del usuario 1 (morado):** Está compuesto por tres lóbulos principales, dos de ellos están unidos. La anchura de los lóbulos produce dicha unión. El lóbulo que se encuentra en el semiplano inferior es de menor intensidad que los dos anteriores. Aparecen dos lóbulos secundarios. Todos los lóbulos del diagrama de radiación son más estrechos que para dos antenas debido al aumento del número de antenas del array, por este motivo también aparecen los lóbulos secundarios. El lóbulo que apunta hacia 45° donde está situado el usuario 1 tiene en ese ángulo su mayor intensidad. El usuario 2 que se sitúa en 0° se encuentra en un punto cercano al nacimiento del lóbulo que apunta a 45° , lo que provoca que la intensidad de campo que emite la antena en esa dirección sea muy pequeña. El usuario 3 situado en -45° se ve afectado por el lóbulo del semiplano inferior, este lóbulo tiene su mayor intensidad para -90° , lo que provoca que a -45° la intensidad que le llega al usuario 3 no sea muy elevada.
- **Diagrama de radiación del usuario 2 (azul):** Está compuesto por dos lóbulos principales iguales que apuntan a 0° y 180° y dos lóbulos secundarios que apuntan a 90° y -90° . El lóbulo que apunta hacia 0° , apunta a los 3 usuarios, siendo el usuario 2 el que mayor intensidad de campo recibe. Los usuarios 1 y 3 reciben la misma intensidad pero menor que para dos antenas debido a que el estrechamiento de dicho lóbulo provoca que a 45° y -45° la intensidad de campo haya disminuido, no llegándoles apenas radiación.
- **Diagrama de radiación del usuario 3 (rojo):** Es el dual al diagrama de radiación del usuario 1. El análisis por tanto es equivalente cambiando el usuario 1 por el 3. La intensidad de campo que radia la antena hacia el usuario 2 es la misma.

Con esta configuración hemos conseguido que las interferencias se hayan reducido considerablemente respecto a la configuración de dos antenas. Los lóbulos se han estrechado, pero esto no ha sido lo más determinante en la reducción de la interferencia, sino que la situación de los usuarios ha coincidido con puntos en los que los lóbulos emitían poca intensidad de campo. Esta disminución de la interferencia ha sido bastante significativa para todos los usuarios.

5.2.1.1.3. $M=4$

El diagrama de radiación representado corresponde a un sistema formado por un array lineal y uniforme de cuatro antenas. La figura muestra tres diagramas de radiación, cada uno de ellos corresponde a la radiación que emite el conjunto de las cuatro antenas apuntando cada uno hacia el ángulo en el que se encuentra cada uno de los usuarios.

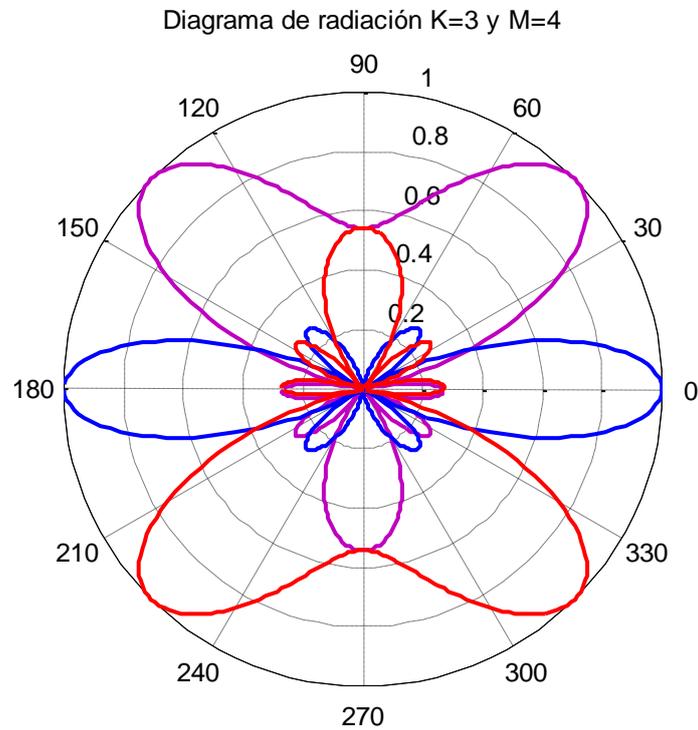


Figura 22: Diagrama de radiación de 3 usuarios y 4 antenas

En la siguiente tabla se muestra el valor del diagrama de radiación normalizado para cada uno de los usuarios respecto al ángulo al que están apuntando las antenas transmisoras.

$K=3$ y $M=4$				
		DR(θ) Normalizado		
		Usuario 1	Usuario 2	Usuario 3
θ	45°	1	0.2689	0.1613
	0°	0.2689	1	0.2689
	-45°	0.1613	0.2689	1

Tabla 4: Valores significativos del diagrama de radiación de 3 usuarios y 4 antenas



Centrándonos en el diagrama de radiación que estamos analizando podemos observar:

- **Diagrama de radiación del usuario 1 (morado):** Está compuesto por tres lóbulos principales, los dos de mayor intensidad están unidos, aunque están más separados que en los escenarios con menor número de antenas. El lóbulo que se encuentra en el semiplano inferior es de menor intensidad que los dos anteriores, la reducción de este lóbulo ha sido bastante importante respecto a los arrays con menor número de antenas. Han aumentado el número de lóbulos secundarios. Todos los lóbulos del diagrama de radiación se han ido estrechando más, lo que produce que esta configuración sea más directiva, ya que concreta más el área al que apuntan las antenas. El lóbulo que apunta hacia 45° donde está situado el usuario 1 tiene en ese ángulo su mayor intensidad. El usuario 2 que se sitúa en 0° se ve influenciado por un lóbulo secundario, lo que produce que en esa dirección la intensidad de campo que emite la antena sea mayor que en el caso de tres antenas. El usuario 3 situado en -45° se ve afectado por otro lóbulo secundario, en este caso la intensidad de campo es un poco menor pero esta disminución es casi despreciable en comparación con el array de tres antenas.
- **Diagrama de radiación del usuario 2 (azul):** Está compuesto por dos lóbulos principales iguales que apuntan a 0° y 180° y cuatro lóbulos secundarios que apuntan aproximadamente a 45° , 135° , -45° y -135° . El usuario 2 es el que mayor intensidad de campo recibe debido a que uno de los dos lóbulos principales apunta hacia él. Los usuarios 1 y 3 reciben la misma intensidad, pero de dos lóbulos secundarios distintos. La aparición de los lóbulos secundarios provoca que la intensidad de campo que emiten las antenas para 45° y -45° sea mayor que en el escenario de tres antenas, pero menor respecto a dos antenas.
- **Diagrama de radiación del usuario 3 (rojo):** Es el dual al diagrama de radiación del usuario 1. El análisis por tanto es equivalente cambiando el usuario 1 por el 3. La intensidad de campo que radia la antena hacia el usuario 2 es la misma.

La aparición de lóbulos secundarios ha provocado que las interferencias hayan aumentado en relación a la configuración de tres antenas debido a la aparición de lóbulos secundarios cercanos a las direcciones en la que se encuentran los usuarios. Respecto a la configuración de dos antenas, como los lóbulos han ido disminuyendo de anchura, la interferencia es menor. Por tanto, esta configuración dará peores prestaciones que la de tres antenas, aunque mejor que la de dos.

5.2.1.1.4. $M=5$

El diagrama de radiación representado corresponde a un sistema formado por un array lineal y uniforme de cinco antenas. La figura muestra tres diagramas de radiación, cada uno de ellos corresponde a la radiación que emite el conjunto de las cinco antenas apuntando cada uno hacia el ángulo en el que se encuentra cada uno de los usuarios.

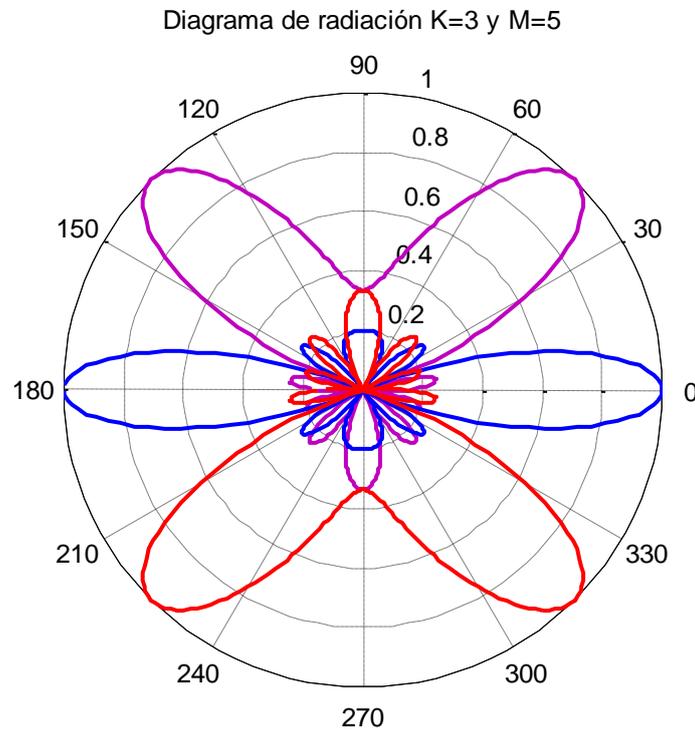


Figura 23: Diagrama de radiación de 3 usuarios y 5 antenas

En la siguiente tabla se muestra el valor del diagrama de radiación normalizado para cada uno de los usuarios respecto al ángulo al que están apuntando las antenas transmisoras.

$K=3$ y $M=5$				
		$DR(\theta)$ Normalizado		
		Usuario 1	Usuario 2	Usuario 3
θ	45°	1	0.1488	0.2498
	0°	0.1488	1	0.1488
	-45°	0.2498	0.1488	1

Tabla 5: Valores significativos del diagrama de radiación de 3 usuarios y 5 antenas

Centrándonos en el diagrama de radiación que estamos analizando podemos observar:

- **Diagrama de radiación del usuario 1 (morado):** Está compuesto por tres lóbulos principales, los dos de mayor intensidad están unidos, aunque la separación entre ellos sigue aumentando. El lóbulo que se encuentra en el semiplano inferior ha disminuido, siendo significativamente menor a los anteriores y acercándose al nivel de los lóbulos secundarios. Han aumentado el número de lóbulos secundarios. Todos los lóbulos del diagrama de radiación se han ido estrechando más, lo que produce que esta configuración sea más directiva. El lóbulo que apunta hacia 45° donde está situado el usuario 1 tiene en ese ángulo su mayor intensidad. El usuario 2 que se sitúa en 0° se ve influenciado por un lóbulo secundario, dicho lóbulo no apunta justamente a 0° , lo que produce que la intensidad de campo para ese ángulo sea menor que para cuatro antenas. El usuario 3 situado en -45° se ve afectado por otro lóbulo secundario, en este caso la intensidad de campo es mayor que para cuatro antenas debido a que el punto de mayor intensidad de ese lóbulo está muy cercano a -45° .
- **Diagrama de radiación del usuario 2 (azul):** Está compuesto por dos lóbulos principales iguales que apuntan a 0° y 180° y cuatro lóbulos secundarios que apuntan aproximadamente a 30° , 150° , -30° y -150° . Además han aparecido dos lóbulos secundarios más anchos en la dirección de 90° y -90° . El usuario 2 es el que mayor intensidad de campo recibe debido a que uno de los dos lóbulos principales apunta hacia él. Los usuarios 1 y 3 reciben la misma intensidad, pero de dos lóbulos secundarios distintos. Dicha intensidad es menor que para cuatro antenas debido a que estos lóbulos secundarios no apuntan hacia ellos, disminuyendo el campo en 45° y -45° . Este desplazamiento en el apuntamiento de estos lóbulos secundarios se debe a la aparición de otros dos lóbulos en 90° y -90° .
- **Diagrama de radiación del usuario 3 (rojo):** Es el dual al diagrama de radiación del usuario 1. El análisis por tanto es equivalente cambiando el usuario 1 por el 3. La intensidad de campo que radia la antena hacia el usuario 2 es la misma.

Esta configuración reduce las interferencias que provoca el usuario 2 al usuario 1 y al 3 y viceversa, pero aumenta las interferencias entre los usuarios 1 y 3. Sería el caso contrario a la configuración de cuatro antenas, por lo que no encontraríamos mejoras respecto a ésta, aunque al aumentar el número de antenas ha aumentado la directividad. La configuración de tres antenas aunque es menos directiva que ésta sigue siendo la que provoca menos interferencias en las direcciones en las que se encuentran los usuarios.

5.2.1.1.5. $M=6$

El diagrama de radiación representado corresponde a un sistema formado por un array lineal y uniforme de seis antenas. La figura muestra tres diagramas de radiación, cada uno de ellos corresponde a la radiación que emite el conjunto de las seis antenas apuntando cada uno hacia el ángulo en el que se encuentra cada uno de los usuarios.

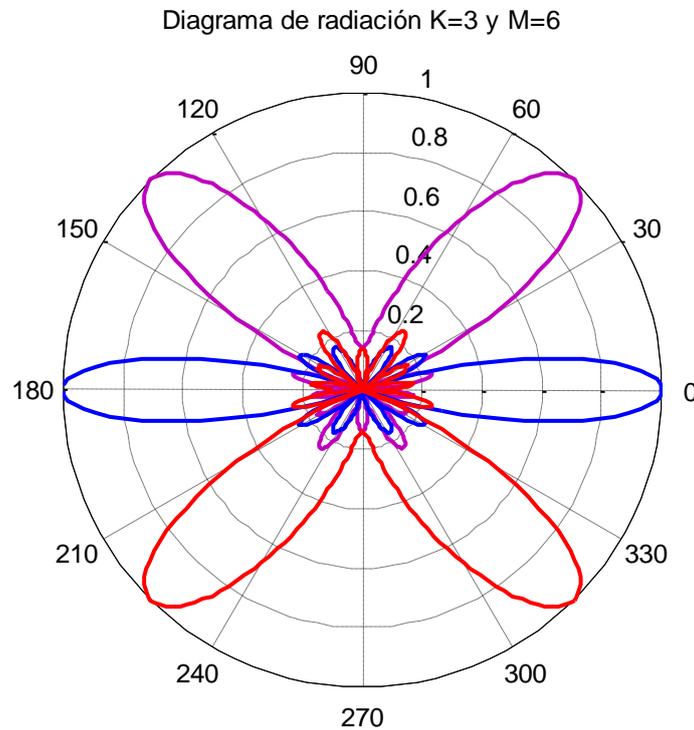


Figura 24: Diagrama de radiación de 3 usuarios y 6 antenas

En la siguiente tabla se muestra el valor del diagrama de radiación normalizado para cada uno de los usuarios respecto al ángulo al que están apuntando las antenas transmisoras.

$K=3$ y $M=6$				
		DR(θ) Normalizado		
		Usuario 1	Usuario 2	Usuario 3
θ	45°	1	0.0692	0.1446
	0°	0.0692	1	0.0692
	-45°	0.1446	0.0692	1

Tabla 6: Valores significativos del diagrama de radiación de 3 usuarios y 6 antenas



Centrándonos en el diagrama de radiación que estamos analizando podemos observar:

- **Diagrama de radiación del usuario 1 (morado):** Está compuesto por dos lóbulos principales, los dos de mayor intensidad están prácticamente separados. El aumento del número de antenas ha provocado que estos lóbulos estén prácticamente diferenciados y que todos los lóbulos se estrechen, aunque la separación entre ellos sigue aumentando. El lóbulo que se encuentra en el semiplano inferior, que en los escenarios de menor número de antenas podíamos considerar como principal, en esta configuración se puede considerar como secundario, ya que su tamaño se asemeja a un lóbulo secundario. El número de lóbulos secundarios ha aumentado, así como se han hecho muy estrechos. El lóbulo que apunta hacia 45° donde está situado el usuario 1 tiene en ese ángulo su mayor intensidad. El usuario 2 que se sitúa en 0° se ve influenciado por un lóbulo secundario, el punto de mayor intensidad de dicho lóbulo se encuentra distante de 0° , lo que provoca que la intensidad en 0° sea muy pequeña. El usuario 3 situado en -45° se ve afectado por otro lóbulo secundario, al igual que para el usuario 2, este lóbulo no apunta hacia -45° , por lo que la intensidad de campo en ese punto es pequeña, aunque mayor que para el usuario 2.
- **Diagrama de radiación del usuario 2 (azul):** Está compuesto por dos lóbulos principales iguales que apuntan a 0° y 180° y ocho lóbulos secundarios que apuntan aproximadamente a 30° , 60° , 120° , 150° , -30° , -60° , -120° y -150° . El usuario 2 es el que mayor intensidad de campo recibe debido a que uno de los dos lóbulos principales apunta hacia él. Los usuarios 1 y 3 reciben la misma intensidad, pero de dos lóbulos secundarios distintos. Dicha intensidad es muy pequeña porque ninguno de los lóbulos secundarios apunta directamente hacia ellos.
- **Diagrama de radiación del usuario 3 (rojo):** Es el dual al diagrama de radiación del usuario 1. El análisis por tanto es equivalente cambiando el usuario 1 por el 3. La intensidad de campo que radia la antena hacia el usuario 2 es la misma.

Esta configuración ha disminuido la interferencia, sobre todo la que provoca el usuario 2 al usuario 1 y 3 y viceversa, aunque también pero no tanto la interferencia entre el usuario 1 y el 3. La configuración de tres antenas tenía unos valores parecidos a ésta aunque algo mayores.

La mayor directividad de esta configuración ha contribuido a la disminución de la interferencia. Han aparecido un número mayor de lóbulos, lo que ha producido el estrechamiento de todos los lóbulos sobre todo los secundarios, lo que ha provocado la disminución de la interferencia.

5.2.1.1.6. $M=7$

El diagrama de radiación representado corresponde a un sistema formado por un array lineal y uniforme de siete antenas. La figura muestra tres diagramas de radiación, cada uno de ellos corresponde a la radiación que emite el conjunto de las siete antenas apuntando cada uno hacia el ángulo en el que se encuentra cada uno de los usuarios.

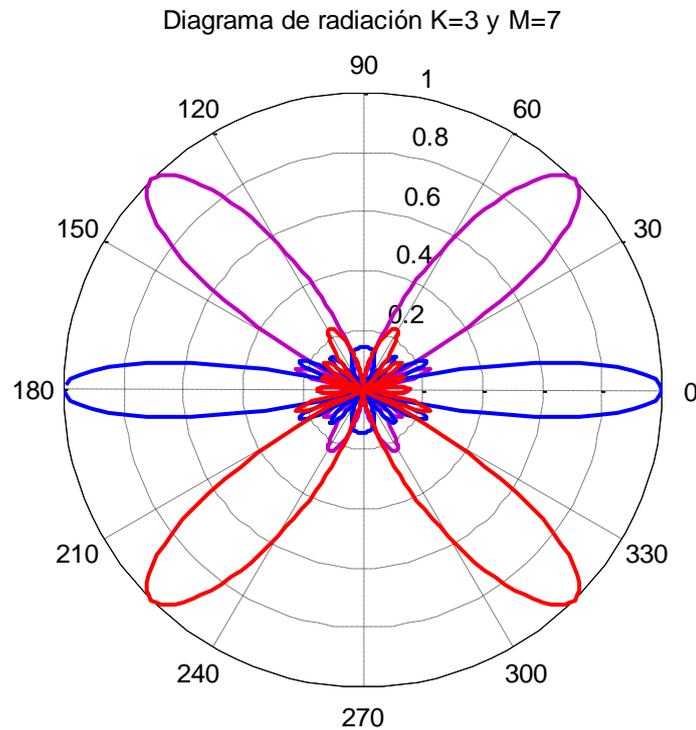


Figura 25: Diagrama de radiación de 3 usuarios y 7 antenas

En la siguiente tabla se muestra el valor del diagrama de radiación normalizado para cada uno de los usuarios respecto al ángulo al que están apuntando las antenas transmisoras.

$K=3$ y $M=7$				
		DR(θ) Normalizado		
		Usuario 1	Usuario 2	Usuario 3
θ	45°	1	0.1589	0.0282
	0°	0.1589	1	0.1589
	-45°	0.0282	0.1589	1

Tabla 7: Valores significativos del diagrama de radiación de 3 usuarios y 7 antenas



Centrándonos en el diagrama de radiación que estamos analizando podemos observar:

- **Diagrama de radiación del usuario 1 (morado):** Está compuesto por dos lóbulos principales. En esta configuración estos dos lóbulos están completamente separados. En el semiplano inferior han aparecido dos pequeños lóbulos en donde en las configuraciones con menor número de antenas había un único lóbulo, estos dos lóbulos apuntan hacia -60° y -120° . Todos los lóbulos se han estrechado pero considerablemente más los lóbulos secundarios, al igual que ha aumentado su número. El lóbulo que apunta hacia 45° donde está situado el usuario 1 tiene en ese ángulo su mayor intensidad. El usuario 2 que se sitúa en 0° se ve influenciado por un lóbulo secundario, este lóbulo apunta aproximadamente a 0° por lo que la intensidad de campo en este punto es mayor que en la configuración de seis antenas. El usuario 3 situado en -45° se ve afectado por otro lóbulo secundario, en este caso el lóbulo no apunta hacia -45° , por lo que la intensidad de campo que emiten las antenas en esta dirección es considerablemente más pequeña que en la configuración de seis antenas.
- **Diagrama de radiación del usuario 2 (azul):** Está compuesto por dos lóbulos principales iguales que apuntan a 0° y 180° y varios lóbulos secundarios, en este caso han vuelto a aparecer los lóbulos que apuntaban a 90° y -90° , siendo éstos más anchos que el resto de los lóbulos secundarios que se han estrechado. El usuario 2 es el que mayor intensidad de campo recibe debido a que uno de los dos lóbulos principales apunta hacia él. Los usuarios 1 y 3 reciben la misma intensidad, pero de dos lóbulos secundarios distintos. Dicha intensidad es mayor que para seis antenas debido a que estos lóbulos secundarios están apuntando aproximadamente a 45° y -45° .
- **Diagrama de radiación del usuario 3 (rojo):** Es el dual al diagrama de radiación del usuario 1. El análisis por tanto es equivalente cambiando el usuario 1 por el 3. La intensidad de campo que radia la antena hacia el usuario 2 es la misma.

Los valores de la interferencia son similares a los obtenidos para la configuración de seis antenas, pero en este caso la menor interferencia es la que se produce entre el usuario 1 y el 3, al contrario que para seis antenas, aunque ésta es algo menor. La interferencia del usuario 2 al usuario 1 y al 3 y viceversa ha aumentado. Por tanto sería la configuración contraria a la de seis antenas.

5.2.1.1.7. $M=8$

El diagrama de radiación representado corresponde a un sistema formado por un array lineal y uniforme de ocho antenas. La figura muestra tres diagramas de radiación, cada uno de ellos corresponde a la radiación que emite el conjunto de las ocho antenas apuntando cada uno hacia el ángulo en el que se encuentra cada uno de los usuarios.

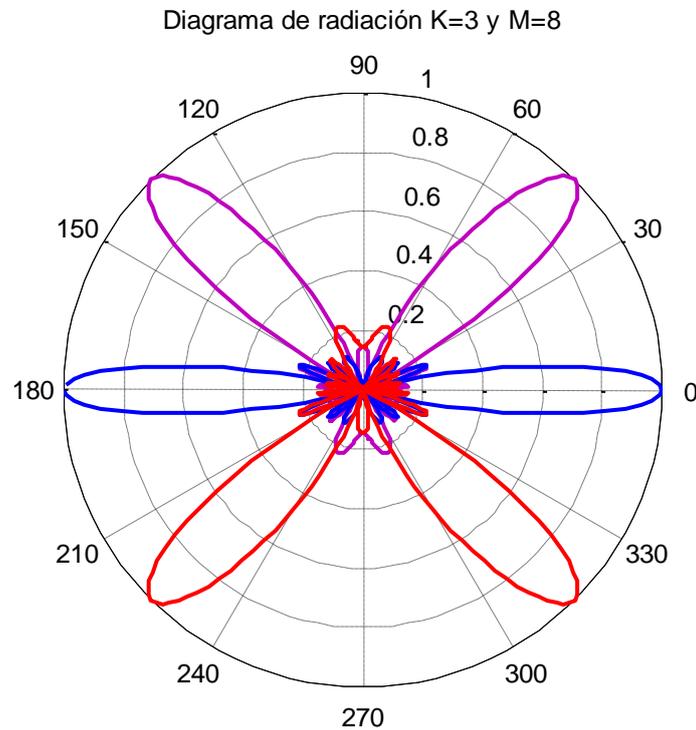


Figura 26: Diagrama de radiación de 3 usuarios y 8 antenas

En la siguiente tabla se muestra el valor del diagrama de radiación normalizado para cada uno de los usuarios respecto al ángulo al que están apuntando las antenas transmisoras.

$K=3$ y $M=8$				
		DR(θ) Normalizado		
		Usuario 1	Usuario 2	Usuario 3
θ	45°	1	0.0716	0.1384
	0°	0.0716	1	0.0716
	-45°	0.1384	0.0716	1

Tabla 8: Valores significativos del diagrama de radiación de 3 usuarios y 8 antenas

Centrándonos en el diagrama de radiación que estamos analizando podemos observar:

- **Diagrama de radiación del usuario 1 (morado):** Está compuesto por dos lóbulos principales. Entre los dos lóbulos principales ha aparecido un lóbulo secundario sobre 90° que ha ensanchado respecto al diagrama de ocho antenas. En el semiplano inferior han aparecido dos pequeños lóbulos en donde en las configuraciones con menor número de antenas había un único lóbulo, en esta configuración estos dos lóbulos aparecen prácticamente unidos. Los lóbulos secundarios, excepto los tres comentados en las líneas anteriores, se han estrechado y han aumentado, ahora son un cúmulo de múltiples lóbulos muy pegados, por lo que su zona de máxima radiación ha disminuido. El lóbulo que apunta hacia 45° donde está situado el usuario 1 tiene en ese ángulo su mayor intensidad. El usuario 2 que se sitúa en 0° se ve influenciado por un lóbulo secundario muy estrecho y que no apunta directamente a 0° , por lo que la intensidad de campo en este punto ha disminuido respecto a la configuración de siete antenas. El usuario 3 situado en -45° se ve afectado por otro lóbulo secundario de los de mayor anchura, por lo que la intensidad de campo que radia la antena en esa dirección es mayor.
- **Diagrama de radiación del usuario 2 (azul):** Está compuesto por dos lóbulos principales iguales que apuntan a 0° y 180° y varios lóbulos secundarios. Todos los lóbulos se han estrechado, pero los lóbulos secundarios son muy estrechos en esta configuración. El usuario 2 es el que mayor intensidad de campo recibe debido a que uno de los dos lóbulos principales apunta hacia él. Los usuarios 1 y 3 reciben la misma intensidad, pero de dos lóbulos secundarios distintos. Dicha intensidad es menor que para siete antenas debido a que estos lóbulos secundarios no están apuntando a 45° y -45° , pero se asemeja a la de la configuración de seis antenas.
- **Diagrama de radiación del usuario 3 (rojo):** Es el dual al diagrama de radiación del usuario 1. El análisis por tanto es equivalente cambiando el usuario 1 por el 3. La intensidad de campo que radia la antena hacia el usuario 2 es la misma.

Las interferencias en esta configuración son muy similares a las obtenidas en la configuración de seis antenas. El aumento de la directividad no ha provocado una disminución de las interferencias.

5.2.1.1.8. $M=9$

El diagrama de radiación representado corresponde a un sistema formado por un array lineal y uniforme de nueve antenas. La figura muestra tres diagramas de radiación, cada uno de ellos corresponde a la radiación que emite el conjunto de las nueve antenas apuntando cada uno hacia el ángulo en el que se encuentra cada uno de los usuarios.

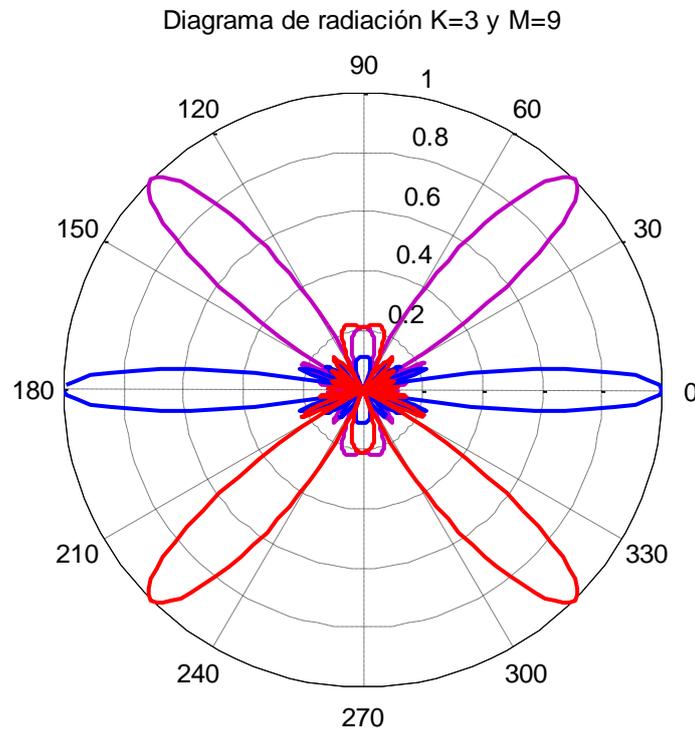


Figura 27: Diagrama de radiación de 3 usuarios y 9 antenas

En la siguiente tabla se muestra el valor del diagrama de radiación normalizado para cada uno de los usuarios respecto al ángulo al que están apuntando las antenas transmisoras.

$K=3$ y $M=9$				
		DR(θ) Normalizado		
		Usuario 1	Usuario 2	Usuario 3
θ	45°	1	0.0671	0.1271
	0°	0.0671	1	0.0671
	-45°	0.1271	0.0671	1

Tabla 9: Valores significativos del diagrama de radiación de 3 usuarios y 9 antenas

Centrándonos en el diagrama de radiación que estamos analizando podemos observar:

- **Diagrama de radiación del usuario 1 (morado):** Está compuesto por dos lóbulos principales. Entre los dos lóbulos principales ha aparecido un lóbulo secundario sobre 90° . En el semiplano inferior han aparecido dos pequeños lóbulos en donde en las configuraciones con menor número de antenas había un único lóbulo, en esta configuración estos dos lóbulos aparecen parcialmente unidos, estos dos lóbulos apuntan hacia -60° y -120° . Todos los lóbulos se han estrechado pero considerablemente más los lóbulos secundarios, al igual que ha aumentado su número. El lóbulo que apunta hacia 45° donde está situado el usuario 1 tiene en ese ángulo su mayor intensidad. El usuario 2 que se sitúa en 0° se ve influenciado por un lóbulo secundario muy estrecho, el valor del campo en este punto es muy similar al caso de ocho antenas. El usuario 3 situado en -45° se ve afectado por otro lóbulo secundario, al igual que para el usuario 2, tiene más o menos el mismo valor que para ocho antenas.
- **Diagrama de radiación del usuario 2 (azul):** Está compuesto por dos lóbulos principales iguales que apuntan a 0° y 180° y varios lóbulos secundarios. Todos los lóbulos se han estrechado, pero los lóbulos secundarios son muy estrechos en esta configuración. El usuario 2 es el que mayor intensidad de campo recibe debido a que uno de los dos lóbulos principales apunta hacia él. Los usuarios 1 y 3 reciben la misma intensidad, pero de dos lóbulos secundarios distintos. Dicha intensidad es muy similar aunque algo menor que para ocho antenas.
- **Diagrama de radiación del usuario 3 (rojo):** Es el dual al diagrama de radiación del usuario 1. El análisis por tanto es equivalente cambiando el usuario 1 por el 3. La intensidad de campo que radia la antena hacia el usuario 2 es la misma.

Esta configuración nos ofrece unas prestaciones muy similares a la de ocho y seis antenas. Las interferencias han disminuido un poco en relación a dichas configuraciones, pero esta disminución no ha sido muy significativa.

5.2.1.1.9. $M=10$

El diagrama de radiación representado corresponde a un sistema formado por un array lineal y uniforme de diez antenas. La figura muestra tres diagramas de radiación, cada uno de ellos corresponde a la radiación que emite el conjunto de las diez antenas apuntando cada uno hacia el ángulo en el que se encuentra cada uno de los usuarios.

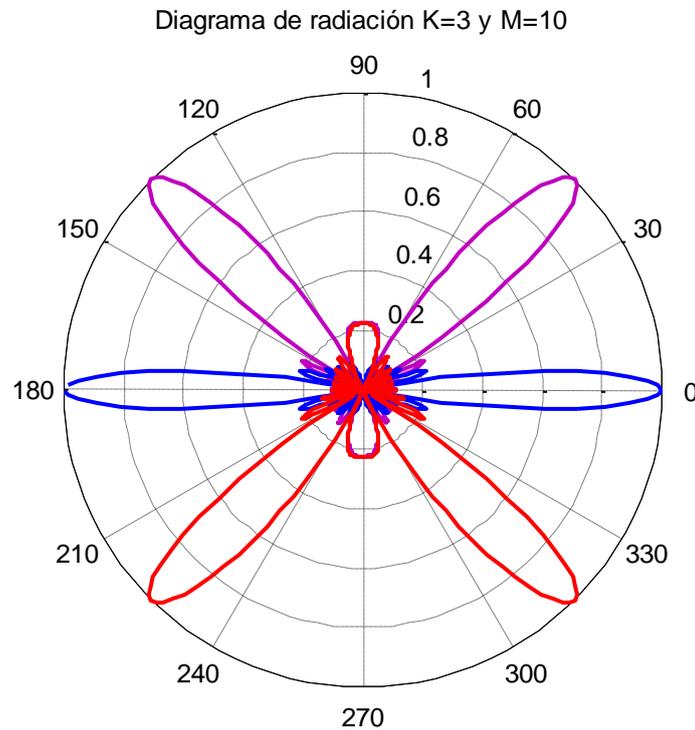


Figura 28: Diagrama de radiación de 3 usuarios y 10 antenas

En la siguiente tabla se muestra el valor del diagrama de radiación normalizado para cada uno de los usuarios respecto al ángulo al que están apuntando las antenas transmisoras.

$K=3$ y $M=10$				
		$DR(\theta)$ Normalizado		
		Usuario 1	Usuario 2	Usuario 3
θ	45°	1	0.1109	0.0278
	0°	0.1109	1	0.1109
	-45°	0.0278	0.1109	1

Tabla 10: Valores significativos del diagrama de radiación de 3 usuarios y 10 antenas

Centrándonos en el diagrama de radiación que estamos analizando podemos observar:

- **Diagrama de radiación del usuario 1 (morado):** Está compuesto por dos lóbulos principales. Entre los dos lóbulos principales ha aparecido un lóbulo secundario sobre 90° que ha ensanchado respecto al diagrama de ocho antenas. En el semiplano inferior han aparecido un lóbulo en -90° . Estos dos lóbulos secundarios tienen una mayor intensidad de campo en 90° y -90° y son más anchos que el resto de los lóbulos secundarios. El resto de lóbulos secundarios se han reducido de tamaño radiando muy poco y se han estrechado. El lóbulo que apunta hacia 45° donde está situado el usuario 1 tiene en ese ángulo su mayor intensidad. El usuario 2 que se sitúa en 0° está apuntado por un lóbulo secundario muy pequeño, por lo que la radiación que le llega es baja. El usuario 3 situado en -45° no recibe radiación directa de uno de los lóbulos secundarios, por lo que la intensidad de campo que le llega es muy pequeña.
- **Diagrama de radiación del usuario 2 (azul):** Está compuesto por dos lóbulos principales iguales que apuntan a 0° y 180° y varios lóbulos secundarios. Todos los lóbulos se han estrechado, pero los lóbulos secundarios son muy estrechos en esta configuración. El usuario 2 es el que mayor intensidad de campo recibe debido a que uno de los dos lóbulos principales apunta hacia él. Los usuarios 1 y 3 reciben la misma intensidad, pero de dos lóbulos secundarios distintos. Estos lóbulos secundarios son muy pequeños, por lo que la radiación que le llega es baja.
- **Diagrama de radiación del usuario 3 (rojo):** Es el dual al diagrama de radiación del usuario 1. El análisis por tanto es equivalente cambiando el usuario 1 por el 3. La intensidad de campo que radia la antena hacia el usuario 2 es la misma.

Esta configuración es muy similar a la de siete antenas, aunque en este caso las interferencias han disminuido sobre todo las del usuario 2 a los usuarios 1 y 3 y viceversa. Por tanto, el aumento de la directividad ha contribuido a la disminución de las interferencias entre estos usuarios.

5.2.1.2. $K=5$

Nuestro sistema está compuesto por cinco usuarios que se sitúan a distinto ángulo respecto al array de antenas. El usuario 1 está situado en 60° , el usuario 2 en 30° , el usuario 3 en 0° , el usuario 4 en -30° y el usuario 5 en -60° .

5.2.1.2.1. $M=2$

El diagrama de radiación representado corresponde a un sistema formado por un array lineal y uniforme de dos antenas. La figura muestra cinco diagramas de radiación, cada uno de ellos corresponde a la radiación que emite el conjunto de las dos antenas apuntando cada uno hacia el ángulo en el que se encuentra cada uno de los usuarios.

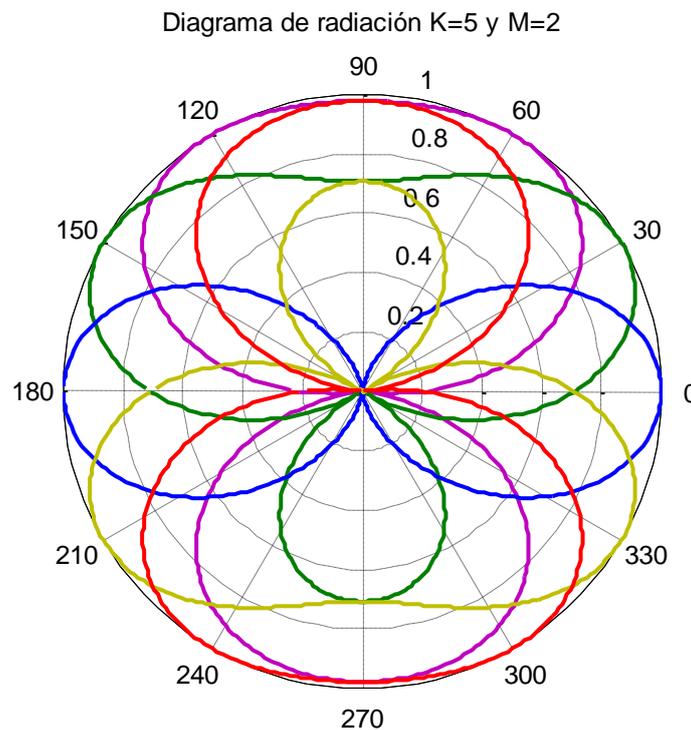


Figura 29: Diagrama de radiación de 5 usuarios y 2 antenas

En la siguiente tabla se muestra el valor del diagrama de radiación normalizado para cada uno de los usuarios respecto al ángulo al que están apuntando las antenas transmisoras.

K=5 y M=2						
	DR(θ) normalizado					
	Usuario 1	Usuario 2	Usuario 3	Usuario 4	Usuario 5	
θ	60°	1	0.8392	0.2089	0.5438	0.9127
	30°	0.8392	1	0.7071	0	0.5438
	0°	0.2089	0.7071	1	0.7071	0.2089
	-30°	0.5438	0	0.7071	1	0.8392
	-60°	0.9127	0.5438	0.2089	0.8392	1

Tabla 11: Valores significativos del diagrama de radiación de 5 usuarios y 2 antenas

Centrándonos en el diagrama de radiación que estamos analizando podemos observar:

- Diagrama de radiación del usuario 1 (morado):** Está compuesto por dos lóbulos principales. La anchura del lóbulo del semiplano superior es mayor que la del semiplano inferior, además el del semiplano inferior emite una intensidad menor de campo. El lóbulo que apunta hacia 60° donde está situado el usuario 1 tiene en ese ángulo su mayor intensidad. El usuario 2 que se sitúa en 30° y el usuario 3 que se sitúa en 0° se ven influenciados por el lóbulo del semiplano superior, para ambos la intensidad de campo que radian las antenas en esas direcciones son distintas siendo mucho mayor para el usuario 2 que para el 3, ya que se encuentra muy cercano al punto máximo del lóbulo mientras que el usuario 3 se encuentra en un punto en el que el lóbulo empieza a crecer. Los usuarios 4 y 5 situados en -30° y -60° se ven influenciados por el lóbulo del semiplano inferior, al igual que el usuario 2 y 3, la intensidad de campo que emiten hacia el usuario 5 es mayor que hacia el usuario 4, ya que el usuario 5 se encuentra cercano al máximo de ese lóbulo.
- Diagrama de radiación del usuario 2 (verde):** Está compuesto por dos lóbulos principales, aunque realmente son tres porque dos de ellos están prácticamente unidos, formando un único lóbulo cuyos máximos apuntan a 30° y 150°. El lóbulo del semiplano superior apunta hacia el usuario 1, 2 y 3 siendo la mayor intensidad la que recibe el usuario 2, ya que este diagrama de radiación está diseñado para que apunte hacia él. Los usuarios 1 y 3 están en un punto en el que perciben una alta intensidad de campo. El usuario 4 está situado en el punto en el que se unen los dos lóbulos, por lo que la radiación que emiten las antenas en ese punto es nula. El usuario 5, situado en -60°, recibe la intensidad de campo del lóbulo del semiplano inferior que es bastante menor al del semiplano superior y más estrecho, por lo que la intensidad de campo en este punto es menor que para los usuarios 1, 2 y 3.



- **Diagrama de radiación del usuario 3 (azul):** Está compuesto por dos lóbulos principales iguales que apuntan a 0° y 180° . El mismo lóbulo apunta hacia los cinco usuarios pero la mayor intensidad la recibe el usuario 3 situado en 0° . Los usuarios 2 y 4 al estar situados como en espejo respecto al usuario 3 reciben la misma intensidad pero menor que el usuario 3 debido a que en estos puntos el lóbulo está en zona de crecimiento/decrecimiento, al igual que los usuarios 1 y 5 que reciben la misma intensidad de campo pero menor que los usuarios 2 y 4 debido a que se encuentran cercanos al punto del nacimiento del lóbulo.
- **Diagrama de radiación del usuario 4 (amarillo):** Es el dual al diagrama de radiación del usuario 2. Los dos lóbulos que están unidos se encuentran en la mitad inferior del diagrama polar y el que era un poco menor se encuentra en la mitad superior al contrario del diagrama de radiación del usuario 2. El análisis por tanto es equivalente cambiando el usuario 2 por el 4 y el usuario 1 por el 5. El usuario 3 tiene la misma influencia.
- **Diagrama de radiación del usuario 5 (rojo):** Es el dual al diagrama de radiación del usuario 1. El lóbulo más estrecho se encuentra en el semiplano superior y el más ancho en el inferior, al contrario que para el diagrama de radiación del usuario 1. El análisis por tanto es equivalente cambiando el usuario 1 por el 5 y el usuario 2 por el 4. El usuario 3 no varía.

Esta configuración presenta unos lóbulos muy anchos, debido a que al estar compuesta por sólo dos antenas no es muy directiva. La anchura de los lóbulos determina que se produzcan muchas interferencias, sobre todo cabe destacar la interferencia entre el usuario 1 y el 5 y entre los usuarios 2 y 4 con los usuarios 1 y 5.

5.2.1.2.2. $M=3$

El diagrama de radiación representado corresponde a un sistema formado por un array lineal y uniforme de tres antenas. La figura muestra cinco diagramas de radiación, cada uno de ellos corresponde a la radiación que emite el conjunto de las tres antenas apuntando cada uno hacia el ángulo en el que se encuentra cada uno de los usuarios.

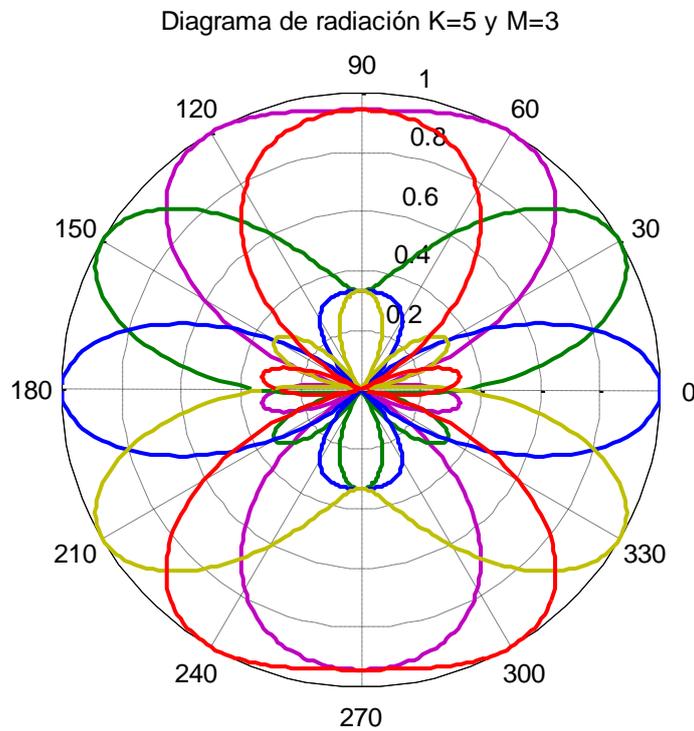


Figura 30: Diagrama de radiación de 5 usuarios y 3 antenas

En la siguiente tabla se muestra el valor del diagrama de radiación normalizado para cada uno de los usuarios respecto al ángulo al que están apuntando las antenas transmisoras.

$K=5$ y $M=3$						
		DR(θ) normalizado				
		Usuario 1	Usuario 2	Usuario 3	Usuario 4	Usuario 5
θ	60°	1	0.6057	0.2751	0.0609	0.7774
	30°	0.6057	1	0.3333	0.3333	0.0609
	0°	0.2751	0.3333	1	0.3333	0.2751
	-30°	0.0609	0.3333	0.3333	1	0.6057
	-60°	0.7774	0.0609	0.2751	0.6057	1

Tabla 12: Valores significativos del diagrama de radiación de 5 usuarios y 3 antenas



Centrándonos en el diagrama de radiación que estamos analizando podemos observar:

- **Diagrama de radiación del usuario 1 (morado):** Está compuesto por dos lóbulos principales. La anchura del lóbulo del semiplano superior es mayor que la del semiplano inferior, además el del semiplano inferior emite una intensidad menor de campo. Se han estrechado los lóbulos principales y han aparecido dos lóbulos secundarios apuntando aproximadamente a 10° y 170° . El lóbulo que apunta hacia 60° donde está situado el usuario 1 tiene en ese ángulo su mayor intensidad. El usuario 2 que se sitúa en 30° y el usuario 3 que se sitúa en 0° se ven influenciados por el lóbulo del semiplano superior, para ambos la intensidad de campo que radian las antenas en esas direcciones son distintas siendo mucho mayor para el usuario 2 que para el 3, ya que se encuentra muy cercano al punto máximo del lóbulo mientras que el usuario 3 se encuentra en un punto en el que el lóbulo empieza a crecer, en este caso al estrecharse el lóbulo, la intensidad que percibe el usuario 2 ha disminuido. Los usuarios 4 y 5 situados en -30° y -60° se ven influenciados por el lóbulo del semiplano inferior, al igual que el usuario 2 y 3, la intensidad de campo que emiten hacia el usuario 5 es mayor que hacia el usuario 4, ya que el usuario 5 se encuentra cercano al máximo de ese lóbulo.
- **Diagrama de radiación del usuario 2 (verde):** Está compuesto por tres lóbulos principales, aunque dos de ellos están parcialmente unidos, estos lóbulos apuntan a 30° y 150° y el del semiplano inferior a -90° . Los lóbulos principales se han estrechado y han aparecido dos lóbulos secundarios que apuntan a -30° y a -150° . El lóbulo del semiplano superior apunta hacia el usuario 1, 2 y 3 siendo la mayor intensidad la que recibe el usuario 2, ya que este diagrama de radiación está diseñado para que apunte hacia él. Los usuarios 1 y 3 están en un punto en el que perciben una alta intensidad de campo, pero menor que para dos antenas debido al estrechamiento de los lóbulos. El usuario 4 está en la dirección de apuntamiento de uno de los lóbulos secundarios, por lo que en este caso si percibe radiación. El usuario 5, situado en -60° , recibe la intensidad de campo del lóbulo del semiplano inferior, este lóbulo se ha estrechado bastante por lo que casi no emite en esa dirección.
- **Diagrama de radiación del usuario 3 (azul):** Está compuesto por dos lóbulos principales iguales que apuntan a 0° y 180° y dos lóbulos secundarios que apuntan a 90° y -90° . El lóbulo principal apunta hacia los usuarios 2, 3 y 4, pero la mayor intensidad la recibe el usuario 3 situado en 0° . Los usuarios 2 y 4 al estar situados como en espejo respecto al usuario 3 reciben la misma intensidad pero menor que el usuario 3 debido a que en estos puntos el lóbulo está en zona de crecimiento/decrecimiento, el estrechamiento del lóbulo ha disminuido la



intensidad radiada hacia ellos. Los usuarios 1 y 5 reciben la misma intensidad de campo pero cada uno de un lóbulo secundario, es algo mayor que para dos antenas.

- **Diagrama de radiación del usuario 4 (amarillo):** Es el dual al diagrama de radiación del usuario 2. El análisis por tanto es equivalente cambiando el usuario 2 por el 4 y el usuario 1 por el 5. El usuario 3 tiene la misma influencia.
- **Diagrama de radiación del usuario 5 (rojo):** Es el dual al diagrama de radiación del usuario 1. El lóbulo más estrecho se encuentra en el semiplano superior y el más ancho en el inferior, al contrario que para el diagrama de radiación del usuario 1. El análisis por tanto es equivalente cambiando el usuario 1 por el 5 y el usuario 2 por el 4. El usuario 3 no varía.

La aparición de los lóbulos secundarios ha provocado la disminución de las interferencias, pero éstas siguen siendo altas para alguno de los usuarios. Para otros, el estrechamiento de los lóbulos ha hecho que disminuya considerablemente las interferencias que recibían.

5.2.1.2.3. $M=4$

El diagrama de radiación representado corresponde a un sistema formado por un array lineal y uniforme de cuatro antenas. La figura muestra cinco diagramas de radiación, cada uno de ellos corresponde a la radiación que emite el conjunto de las cuatro antenas apuntando cada uno hacia el ángulo en el que se encuentra cada uno de los usuarios.

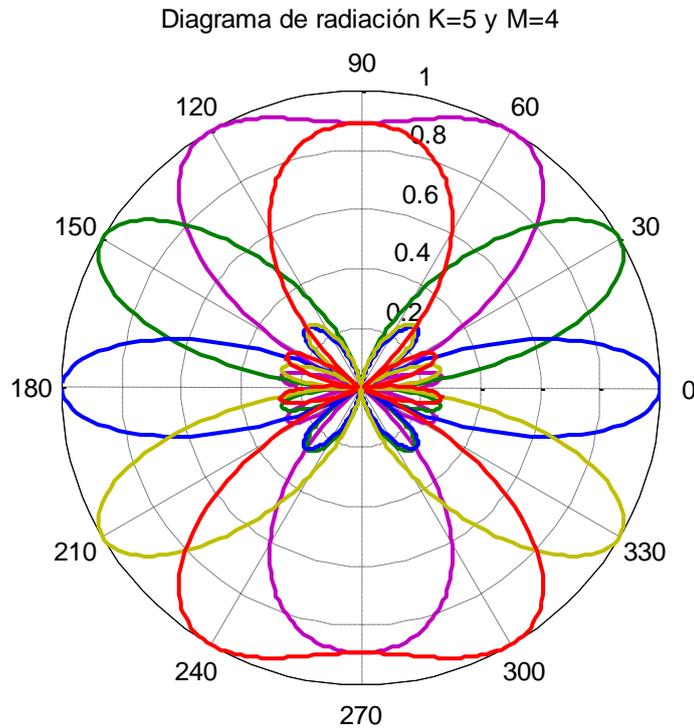


Figura 31: Diagrama de radiación de 5 usuarios y 4 antenas

En la siguiente tabla se muestra el valor del diagrama de radiación normalizado para cada uno de los usuarios respecto al ángulo al que están apuntando las antenas transmisoras.

K=5 y M=4						
		DR(θ) normalizado				
		Usuario 1	Usuario 2	Usuario 3	Usuario 4	Usuario 5
θ	60°	1	0.3429	0.1907	0.2222	0.6080
	30°	0.3429	1	0	0	0.2222
	0°	0.1907	0	1	0	0.1907
	-30°	0.2222	0	0	1	0.3429
	-60°	0.6080	0.2222	0.1907	0.3429	1

Tabla 13: Valores significativos del diagrama de radiación de 5 usuarios y 4 antenas



Centrándonos en el diagrama de radiación que estamos analizando podemos observar:

- **Diagrama de radiación del usuario 1 (morado):** Está compuesto por dos lóbulos principales, aunque el lóbulo del semiplano superior se está dividiendo en dos, aunque en esta configuración todavía están muy unidos. La anchura del lóbulo del semiplano superior es mayor que la del semiplano inferior, además el del semiplano inferior emite una intensidad menor de campo. Se han estrechado los lóbulos principales y han aparecido cuatro lóbulos secundarios. El lóbulo que apunta hacia 60° donde está situado el usuario 1 tiene en ese ángulo su mayor intensidad. El usuario 2 que se sitúa en 30° también se ve influenciado por el lóbulo principal del semiplano superior, aunque el estrechamiento del lóbulo ha provocado la disminución de la intensidad de campo que emiten las antenas en este punto. El usuario 3 se ve influenciado por uno de los lóbulos secundarios, siendo baja la intensidad de campo en este punto. El usuario 4 también está apuntado por otro lóbulo secundario y el usuario 5 por el principal del semiplano inferior.
- **Diagrama de radiación del usuario 2 (verde):** Está compuesto por dos lóbulos principales, ya que ha desaparecido el lóbulo que apuntaba a -90° . Los lóbulos principales se han estrechado y han aparecido más lóbulos secundarios. El lóbulo del semiplano superior apunta hacia el usuario 1 y 2, siendo la mayor intensidad la que recibe el usuario 2, ya que este diagrama de radiación está diseñado para que apunte hacia él. El usuario 1 recibe poca intensidad debido a que se encuentra al comienzo del lóbulo. Los usuarios 3 y 4 no están en la dirección de apuntamiento de ninguno de los lóbulos por lo que no reciben la intensidad del campo. El usuario 5 está en la dirección de apuntamiento de uno de los lóbulos secundarios, por lo que recibe intensidad aunque sea poca.
- **Diagrama de radiación del usuario 3 (azul):** Está compuesto por dos lóbulos principales iguales que apuntan a 0° y 180° y cuatro lóbulos secundarios. El lóbulo principal apunta hacia el usuario 3, recibiendo la mayor intensidad. Los usuarios 2 y 4 no tienen ningún lóbulo apuntando en esas direcciones, por lo que no perciben intensidad de campo. Los usuarios 1 y 5 reciben la misma intensidad de campo pero cada uno de un lóbulo secundario, es menor que para tres antenas.
- **Diagrama de radiación del usuario 4 (amarillo):** Es el dual al diagrama de radiación del usuario 2. El análisis por tanto es equivalente cambiando el usuario 2 por el 4 y el usuario 1 por el 5. El usuario 3 tiene la misma influencia.



- **Diagrama de radiación del usuario 5 (rojo):** Es el dual al diagrama de radiación del usuario 1. El análisis por tanto es equivalente cambiando el usuario 1 por el 5 y el usuario 2 por el 4. El usuario 3 no varía.

Esta configuración ha disminuido las interferencias frente a las configuraciones de dos y tres antenas. El usuario 2 no provoca interferencias a los usuarios 3 y 4, al igual que el usuario 3 a los usuarios 2 y 4 y el usuario 4 a los usuarios 2 y 3. El resto sí que reciben interferencias, cabe destacar que el usuario 1 emite interferencias al resto de los usuarios al igual que el 5, pero estas interferencias son menores a las de configuraciones con menor número de antenas.

5.2.1.2.4. $M=5$

El diagrama de radiación representado corresponde a un sistema formado por un array lineal y uniforme de cinco antenas. La figura muestra cinco diagramas de radiación, cada uno de ellos corresponde a la radiación que emite el conjunto de las cinco antenas apuntando cada uno hacia el ángulo en el que se encuentra cada uno de los usuarios.

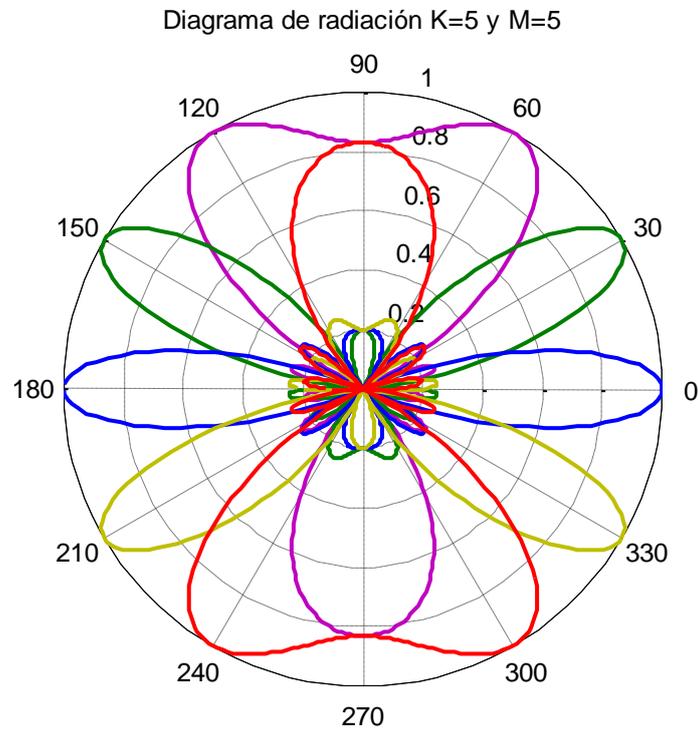


Figura 32: Diagrama de radiación de 5 usuarios y 5 antenas

En la siguiente tabla se muestra el valor del diagrama de radiación normalizado para cada uno de los usuarios respecto al ángulo al que están apuntando las antenas transmisoras.

K=5 y M=5						
		DR(θ) normalizado				
		Usuario 1	Usuario 2	Usuario 3	Usuario 4	Usuario 5
θ	60°	1	0.0970	0.1014	0.2299	0.4214
	30°	0.0970	1	0.2	0.2	0.2299
	0°	0.1014	0.2	1	0.2	0.1014
	-30°	0.2299	0.2	0.2	1	0.0970
	-60°	0.4214	0.2299	0.1014	0.0970	1

Tabla 14: Valores significativos del diagrama de radiación de 5 usuarios y 5 antenas



Centrándonos en el diagrama de radiación que estamos analizando podemos observar:

- **Diagrama de radiación del usuario 1 (morado):** Está compuesto por tres lóbulos principales, aunque los del semiplano superior están parcialmente unidos. La anchura conjunta de los dos lóbulos del semiplano superior es mayor que la del semiplano inferior, además el del semiplano inferior emite una intensidad menor de campo. Se han estrechado los lóbulos principales y han aparecido más lóbulos secundarios. El lóbulo que apunta hacia 60° donde está situado el usuario 1 tiene en ese ángulo su mayor intensidad. El usuario 2 que se sitúa en 30° también se ve influenciado por el lóbulo principal del semiplano superior, aunque el estrechamiento del lóbulo ha provocado que esté cercano al punto de nacimiento del lóbulo, por lo que la intensidad de campo que emiten las antenas en este punto es muy pequeña. El usuario 3 se ve influenciado por uno de los lóbulos secundarios, siendo baja la intensidad de campo en este punto. El usuario 4 también está apuntado por otro lóbulo secundario y el usuario 5 por el principal del semiplano inferior. En todos, la intensidad de campo ha disminuido con relación al array de cuatro antenas.
- **Diagrama de radiación del usuario 2 (verde):** Está compuesto por dos lóbulos principales. Los lóbulos principales se han estrechado y han aparecido más lóbulos secundarios. Han aparecido dos lóbulos secundarios parcialmente unidos y más anchos que los ya existentes en el semiplano inferior. El lóbulo del semiplano superior apunta hacia el usuario 1 y 2, siendo la mayor intensidad la que recibe el usuario 2, ya que este diagrama de radiación está diseñado para que apunte hacia él. El usuario 1 recibe poca intensidad debido a que se encuentra al comienzo del lóbulo. Los usuarios 3 y 4 están en la dirección de apuntamiento de dos lóbulos secundarios iguales recibiendo la misma intensidad de campo. El usuario 5 está en la dirección de apuntamiento de uno de los lóbulos secundarios más grandes, por lo que recibe mayor intensidad que el resto a excepción del 2.
- **Diagrama de radiación del usuario 3 (azul):** Está compuesto por dos lóbulos principales iguales que apuntan a 0° y 180° y varios lóbulos secundarios. Han vuelto a aparecer los lóbulos secundarios que apuntaban a 90° y -90° , éstos son más anchos que el resto. El lóbulo principal apunta hacia el usuario 3, recibiendo la mayor intensidad. Los usuarios 2 y 4 están en la dirección de apuntamiento de dos lóbulos secundarios iguales recibiendo la misma intensidad de campo. Los usuarios 1 y 5 reciben la misma intensidad de campo pero cada uno de un lóbulo secundario.



- **Diagrama de radiación del usuario 4 (amarillo):** Es el dual al diagrama de radiación del usuario 2. El análisis por tanto es equivalente cambiando el usuario 2 por el 4 y el usuario 1 por el 5. El usuario 3 tiene la misma influencia.
- **Diagrama de radiación del usuario 5 (rojo):** Es el dual al diagrama de radiación del usuario 1. El análisis por tanto es equivalente cambiando el usuario 1 por el 5 y el usuario 2 por el 4. El usuario 3 no varía.

Esta configuración es más directiva que las anteriores, apareciendo lóbulos secundarios en las direcciones en las que se encuentran los usuarios. Esto ha provocado que con respecto a la configuración de cuatro antenas, para los usuarios que no se veían influenciados por las interferencias de otros usuarios en esta configuración sí que tengan interferencias. Las interferencias que provocaban los usuarios 1 y 5 al resto de los usuarios han disminuido.

5.2.1.2.5. $M=6$

El diagrama de radiación representado corresponde a un sistema formado por un array lineal y uniforme de seis antenas. La figura muestra cinco diagramas de radiación, cada uno de ellos corresponde a la radiación que emite el conjunto de las seis antenas apuntando cada uno hacia el ángulo en el que se encuentra cada uno de los usuarios.

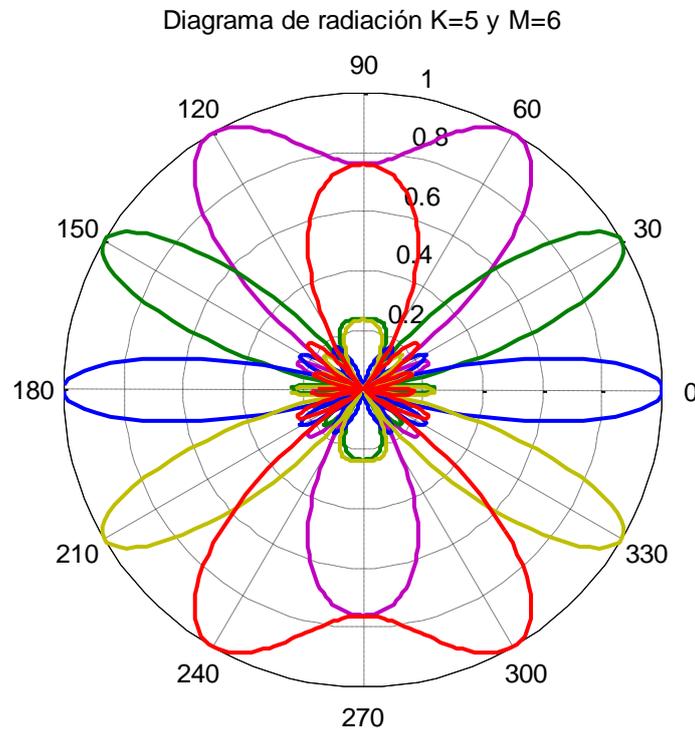


Figura 33: Diagrama de radiación de 5 usuarios y 6 antenas

En la siguiente tabla se muestra el valor del diagrama de radiación normalizado para cada uno de los usuarios respecto al ángulo al que están apuntando las antenas transmisoras.

$K=5$ y $M=6$						
		DR(θ) normalizado				
		Usuario 1	Usuario 2	Usuario 3	Usuario 4	Usuario 5
θ	60°	1	0.0929	0.1624	0.0602	0.2358
	30°	0.0929	1	0.2357	0	0.0602
	0°	0.1624	0.2357	1	0.2357	0.1624
	-30°	0.0602	0	0.2357	1	0.0929
	-60°	0.2358	0.0602	0.1624	0.0929	1

Tabla 15: Valores significativos del diagrama de radiación de 5 usuarios y 6 antenas



Centrándonos en el diagrama de radiación que estamos analizando podemos observar:

- **Diagrama de radiación del usuario 1 (morado):** Está compuesto por tres lóbulos principales, aunque los del semiplano superior están parcialmente unidos. La anchura conjunta de los dos lóbulos del semiplano superior es mayor que la del semiplano inferior, además el del semiplano inferior emite una intensidad menor de campo. Se han estrechado los lóbulos principales y han aparecido más lóbulos secundarios. El lóbulo que apunta hacia 60° donde está situado el usuario 1 tiene en ese ángulo su mayor intensidad. El usuario 2 que se sitúa en 30° se ve influenciado por uno de los lóbulos secundarios del semiplano superior, aunque al ser este lóbulo tan estrecho la intensidad que le llega al usuario 2 es muy pequeña. El usuario 3 se ve influenciado por otro de los lóbulos secundarios, siendo la intensidad de campo en este punto mayor que para el usuario 2. El usuario 4 también está apuntado por otro lóbulo secundario en las mismas condiciones que el usuario 2. El usuario 5 es el que mayor intensidad de campo recibe de otro de los lóbulos secundarios en comparación con los usuarios 2, 3 y 4.
- **Diagrama de radiación del usuario 2 (verde):** Está compuesto por dos lóbulos principales. Los lóbulos principales se han estrechado y han aparecido más lóbulos secundarios. Han aparecido dos lóbulos secundarios apuntando a 90° y -90° más anchos además de otros lóbulos secundarios menores y más estrechos. El lóbulo del semiplano superior apunta hacia el usuario 1 y 2, siendo la mayor intensidad la que recibe el usuario 2, ya que este diagrama de radiación está diseñado para que apunte hacia él. El usuario 1 recibe poca intensidad debido a que se encuentra al comienzo del lóbulo. El usuario 3 está en la dirección de apuntamiento de uno de los lóbulos secundarios por lo que su intensidad es mayor que la del resto a excepción del usuario 2. El usuario 4 está en una dirección en la que no apunta ninguno de los lóbulos, por lo que no recibe intensidad de campo de las antenas. El usuario 5 está en la zona de nacimiento del lóbulo secundario que apunta a -90° , por lo que la intensidad que radian las antenas en esa dirección es muy pequeña.
- **Diagrama de radiación del usuario 3 (azul):** Está compuesto por dos lóbulos principales iguales que apuntan a 0° y 180° y varios lóbulos secundarios. Hay lóbulos secundarios apuntando a 60° , 30° , -30° y -60° aproximadamente, por lo que la intensidad de campo que emiten las antenas en esas direcciones será considerable respecto a otras configuraciones con menos antenas. El lóbulo principal apunta hacia el usuario 3, recibiendo la mayor intensidad. Los usuarios 2 y 4 están en la dirección de apuntamiento de dos lóbulos secundarios iguales recibiendo



la misma intensidad de campo. Los usuarios 1 y 5 reciben la misma intensidad de campo pero cada uno de un lóbulo secundario.

- **Diagrama de radiación del usuario 4 (amarillo):** Es el dual al diagrama de radiación del usuario 2. El análisis por tanto es equivalente cambiando el usuario 2 por el 4 y el usuario 1 por el 5. El usuario 3 tiene la misma influencia.
- **Diagrama de radiación del usuario 5 (rojo):** Es el dual al diagrama de radiación del usuario 1. El análisis por tanto es equivalente cambiando el usuario 1 por el 5 y el usuario 2 por el 4. El usuario 3 no varía.

Esta configuración ha disminuido considerablemente las interferencias de todos los usuarios, aunque ha aumentado la interferencia que emite el usuario 3 en la dirección de los usuarios 2 y 4. Aunque ha aumentado para esos usuarios, para el resto ha disminuido, por lo que el aumento del número de antenas ha beneficiado la reducción de la interferencia.

5.2.1.2.6. $M=7$

El diagrama de radiación representado corresponde a un sistema formado por un array lineal y uniforme de siete antenas. La figura muestra cinco diagramas de radiación, cada uno de ellos corresponde a la radiación que emite el conjunto de las siete antenas apuntando cada uno hacia el ángulo en el que se encuentra cada uno de los usuarios.

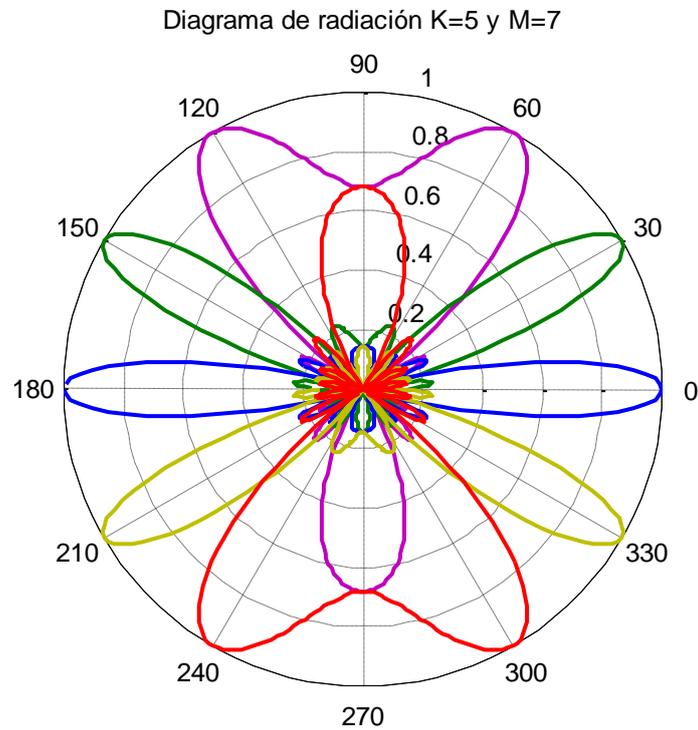


Figura 34: Diagrama de radiación de 5 usuarios y 7 antenas

En la siguiente tabla se muestra el valor del diagrama de radiación normalizado para cada uno de los usuarios respecto al ángulo al que están apuntando las antenas transmisoras.

$K=5$ y $M=7$						
		DR(θ) normalizado				
		Usuario 1	Usuario 2	Usuario 3	Usuario 4	Usuario 5
θ	60°	1	0.2030	0.0142	0.1081	0.0679
	30°	0.2030	1	0.1429	0.1429	0.1081
	0°	0.0142	0.1429	1	0.1429	0.0142
	-30°	0.1081	0.1429	0.1429	1	0.2030
	-60°	0.0679	0.1081	0.0142	0.2030	1

Tabla 16: Valores significativos del diagrama de radiación de 5 usuarios y 7 antenas



Centrándonos en el diagrama de radiación que estamos analizando podemos observar:

- **Diagrama de radiación del usuario 1 (morado):** Está compuesto por tres lóbulos principales, aunque los del semiplano superior están parcialmente unidos. La anchura conjunta de los dos lóbulos del semiplano superior es mayor que la del semiplano inferior, además el del semiplano inferior emite una intensidad menor de campo. Se han estrechado los lóbulos principales y han aparecido más lóbulos secundarios. El lóbulo que apunta hacia 60° donde está situado el usuario 1 tiene en ese ángulo su mayor intensidad. El usuario 2 que se sitúa en 30° se ve influenciado por uno de los lóbulos secundarios que apunta en esa dirección aumentando la intensidad que le llega al usuario 2 respecto a la configuración de seis antenas. El usuario 3 se ve influenciado por otro de los lóbulos secundarios, al no apuntar en esa dirección recibe muy poca intensidad. El usuario 4 también está apuntado por otro lóbulo secundario en este caso el lóbulo no apunta directamente pero sí muy cerca de él. El usuario 5, al igual que el 3 no tiene ningún lóbulo apuntando cerca de él por lo que recibe poca intensidad.
- **Diagrama de radiación del usuario 2 (verde):** Está compuesto por dos lóbulos principales. Los lóbulos principales se han estrechado y han aparecido más lóbulos secundarios. Han aparecido dos lóbulos secundarios apuntando a 60° y 120° más anchos además de otros lóbulos secundarios menores y más estrechos. El lóbulo principal del semiplano superior apunta hacia el usuario 2, siendo el que mayor intensidad recibe, ya que este diagrama de radiación está diseñado para que apunte hacia él. El usuario 1 es el que recibe mayor intensidad respecto a los usuarios 4 y 5 ya que hacia él apunta uno de los lóbulos secundarios más grandes. El usuario 3 y el 4 están en la dirección de apuntamiento de dos de los lóbulos secundarios que emiten con igual intensidad en esas direcciones. El usuario 5 está en la zona de nacimiento de un lóbulo secundario, por lo que la intensidad que radian las antenas en esa dirección es muy pequeña.
- **Diagrama de radiación del usuario 3 (azul):** Está compuesto por dos lóbulos principales iguales que apuntan a 0° y 180° y varios lóbulos secundarios. Dos lóbulos secundarios apuntan a 90° y -90° son mayores al resto de los secundarios. El lóbulo principal apunta hacia el usuario 3, recibiendo la mayor intensidad. Los usuarios 2 y 4 están en la dirección de apuntamiento de dos lóbulos secundarios iguales recibiendo la misma intensidad de campo. Los usuarios 1 y 5 reciben la misma intensidad de campo pero cada uno de un lóbulo secundario, aunque están en la zona de nacimiento de los mismos, por lo que dicha intensidad es muy baja.



- **Diagrama de radiación del usuario 4 (amarillo):** Es el dual al diagrama de radiación del usuario 2. El análisis por tanto es equivalente cambiando el usuario 2 por el 4 y el usuario 1 por el 5. El usuario 3 tiene la misma influencia.
- **Diagrama de radiación del usuario 5 (rojo):** Es el dual al diagrama de radiación del usuario 1. El análisis por tanto es equivalente cambiando el usuario 1 por el 5 y el usuario 2 por el 4. El usuario 3 no varía.

La reducción de la anchura de los lóbulos y la aparición de nuevos lóbulos secundarios más pequeños y estrechos ha beneficiado la reducción de la interferencia de todos los usuarios a excepción de la del usuario 2 al 4 y viceversa.

5.2.1.2.7. $M=8$

El diagrama de radiación representado corresponde a un sistema formado por un array lineal y uniforme de ocho antenas. La figura muestra cinco diagramas de radiación, cada uno de ellos corresponde a la radiación que emite el conjunto de las ocho antenas apuntando cada uno hacia el ángulo en el que se encuentra cada uno de los usuarios.

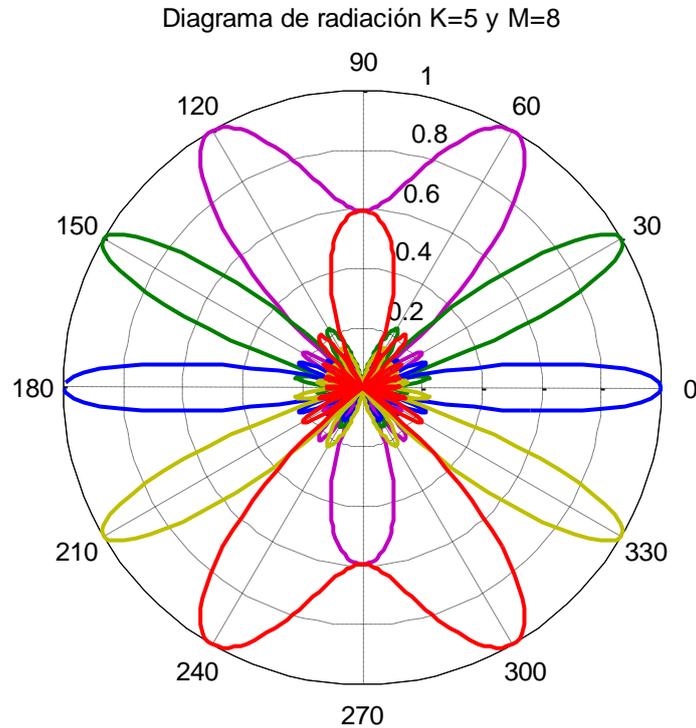


Figura 35: Diagrama de radiación de 5 usuarios y 8 antenas

En la siguiente tabla se muestra el valor del diagrama de radiación normalizado para cada uno de los usuarios respecto al ángulo al que están apuntando las antenas transmisoras.

$K=5$ y $M=8$						
		DR(θ) normalizado				
		Usuario 1	Usuario 2	Usuario 3	Usuario 4	Usuario 5
θ	60°	1	0.2284	0.1270	0.1480	0.0684
	30°	0.2284	1	0	0	0.1480
	0°	0.1270	0	1	0	0.1270
	-30°	0.1480	0	0	1	0.2284
	-60°	0.0684	0.1480	0.1270	0.2284	1

Tabla 17: Valores significativos del diagrama de radiación de 5 usuarios y 8 antenas



Centrándonos en el diagrama de radiación que estamos analizando podemos observar:

- **Diagrama de radiación del usuario 1 (morado):** Está compuesto por tres lóbulos principales, aunque los del semiplano superior están parcialmente unidos. La anchura conjunta de los dos lóbulos del semiplano superior es mayor que la del semiplano inferior, además el del semiplano inferior emite una intensidad menor de campo. Se han estrechado los lóbulos principales y han aumentado la cantidad de lóbulos secundarios. El lóbulo que apunta hacia 60° donde está situado el usuario 1 tiene en ese ángulo su mayor intensidad. El usuario 2 que se sitúa en 30° se ve influenciado por uno de los lóbulos secundarios que apunta en esa dirección, el máximo de ese lóbulo apunta hacia el usuario 2. El usuario 3 se ve influenciado por otro de los lóbulos secundarios, el máximo de éste no apunta exactamente hacia 0° , por lo que la intensidad de campo es menor que para el usuario 2. El usuario 4 también está apuntado por otro lóbulo secundario en este caso el lóbulo no apunta directamente pero sí muy cerca de él. El usuario 5 no tiene ningún lóbulo apuntando cerca de él por lo que recibe poca intensidad.
- **Diagrama de radiación del usuario 2 (verde):** Está compuesto por dos lóbulos principales. Los lóbulos principales se han estrechado y han aparecido más lóbulos secundarios. Hay dos lóbulos secundarios apuntando a 60° y 120° un poco más anchos que los demás lóbulos secundarios que son algo menores y más estrechos. El lóbulo principal del semiplano superior apunta hacia el usuario 2, siendo el que mayor intensidad recibe, ya que este diagrama de radiación está diseñado para que apunte hacia él. El usuario 1 es el que recibe mayor intensidad respecto a los usuarios 3, 4 y 5 ya que hacia él apunta uno de los lóbulos secundarios más grandes. El usuario 3 y el 4 no están en la dirección de apuntamiento de ningún lóbulo por tanto el campo que emiten las antenas en esa dirección es nulo. El usuario 5 está en la zona de crecimiento de un lóbulo secundario, por lo que la intensidad que radian las antenas en esa dirección es más pequeña que para el usuario 2.
- **Diagrama de radiación del usuario 3 (azul):** Está compuesto por dos lóbulos principales iguales que apuntan a 0° y 180° y varios lóbulos secundarios. El lóbulo principal apunta hacia el usuario 3, recibiendo la mayor intensidad. Los usuarios 2 y 4 no están en la dirección de apuntamiento de ninguno de los lóbulos del diagrama de radiación del usuario 3, por lo que la intensidad de campo emitida por las antenas en esta dirección es nula. Los usuarios 1 y 5 reciben la misma intensidad de campo pero cada uno de un lóbulo secundario, aunque están en la zona de crecimiento/decrecimiento de los mismos, por lo que dicha intensidad no es muy alta.



- **Diagrama de radiación del usuario 4 (amarillo):** Es el dual al diagrama de radiación del usuario 2. El análisis por tanto es equivalente cambiando el usuario 2 por el 4 y el usuario 1 por el 5. El usuario 3 tiene la misma influencia.
- **Diagrama de radiación del usuario 5 (rojo):** Es el dual al diagrama de radiación del usuario 1. El análisis por tanto es equivalente cambiando el usuario 1 por el 5 y el usuario 2 por el 4. El usuario 3 no varía.

Es una configuración muy parecida a la de cuatro antenas, porque los usuarios que no recibían interferencias de otros tampoco la reciben en esta configuración (interferencias entre los usuarios 2, 3 y 4). La disminución de la anchura de los lóbulos con respecto a la de cuatro antenas ha provocado que las interferencias que emiten los usuarios 1 y 5 al resto de los usuarios haya disminuido mucho con respecto a la de cuatro antenas sobre todo la interferencia del usuario 1 al 5 y viceversa.

5.2.1.2.8. $M=9$

El diagrama de radiación representado corresponde a un sistema formado por un array lineal y uniforme de nueve antenas. La figura muestra cinco diagramas de radiación, cada uno de ellos corresponde a la radiación que emite el conjunto de las nueve antenas apuntando cada uno hacia el ángulo en el que se encuentra cada uno de los usuarios.

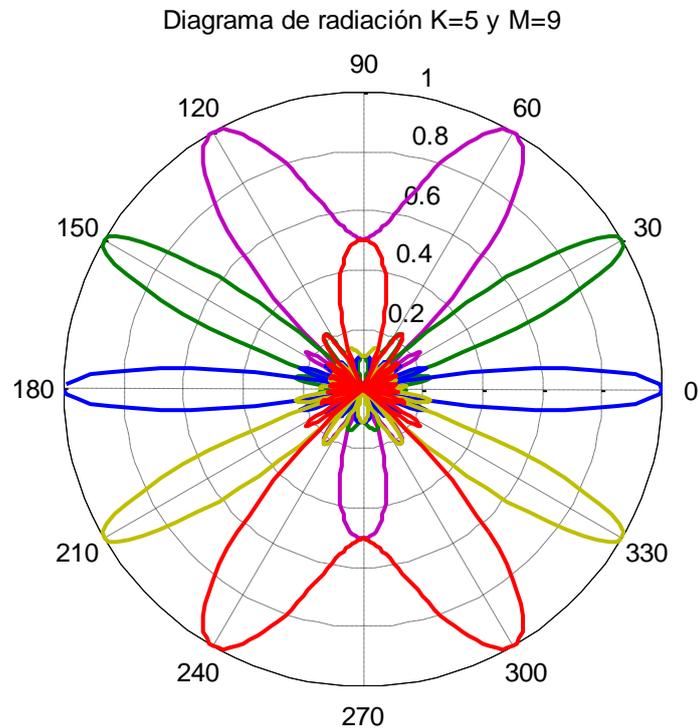


Figura 36: Diagrama de radiación de 5 usuarios y 9 antenas

En la siguiente tabla se muestra el valor del diagrama de radiación normalizado para cada uno de los usuarios respecto al ángulo al que están apuntando las antenas transmisoras.

$K=5$ y $M=9$						
		DR(θ) normalizado				
		Usuario 1	Usuario 2	Usuario 3	Usuario 4	Usuario 5
θ	60°	1	0.1829	0.0361	0.0590	0.1658
	30°	0.1829	1	0.1111	0.1111	0.0590
	0°	0.0361	0.1111	1	0.1111	0.0361
	-30°	0.0590	0.1111	0.1111	1	0.1829
	-60°	0.1638	0.0590	0.0361	0.1829	1

Tabla 18: Valores significativos del diagrama de radiación de 5 usuarios y 9 antenas



Centrándonos en el diagrama de radiación que estamos analizando podemos observar:

- **Diagrama de radiación del usuario 1 (morado):** Está compuesto por tres lóbulos principales, aunque los del semiplano superior están parcialmente unidos. La anchura conjunta de los dos lóbulos del semiplano superior es mayor que la del semiplano inferior, además el del semiplano inferior emite una intensidad menor de campo. Se han estrechado los lóbulos principales y han aumentado la cantidad de lóbulos secundarios. El lóbulo que apunta hacia 60° donde está situado el usuario 1 tiene en ese ángulo su mayor intensidad. El usuario 2 que se sitúa en 30° se ve influenciado por uno de los lóbulos secundarios que apunta en esa dirección, el máximo de ese lóbulo apunta aproximadamente a la dirección en la que se sitúa el usuario 2. El usuario 3 se ve influenciado por otro de los lóbulos secundarios, en este caso el usuario 3 se encuentra en la zona cercana al nacimiento del lóbulo porque la intensidad que recibe este usuario es muy pequeña. El usuario 4 se encuentra en una situación parecida al usuario 3 porque la intensidad que recibe es pequeña en comparación con el máximo de intensidad del lóbulo cercano a la dirección en la que se encuentra este usuario. El usuario 5 se encuentra muy cerca del máximo del lóbulo que apunta en esa dirección.
- **Diagrama de radiación del usuario 2 (verde):** Está compuesto por dos lóbulos principales que se han estrechado mucho. Han aparecido más lóbulos secundarios que son cada vez más estrechos. El lóbulo principal del semiplano superior apunta hacia el usuario 2, siendo el que mayor intensidad recibe, ya que este diagrama de radiación está diseñado para que apunte hacia él. El usuario 1 es el que recibe mayor intensidad respecto a los usuarios 3, 4 y 5 ya que se encuentra en la dirección del máximo de uno de los lóbulos secundarios. El usuario 3 y el 4 están en la dirección de apuntamiento de dos de los lóbulos secundarios que emiten con igual intensidad en esas direcciones. El usuario 5 está en la zona de crecimiento de un lóbulo secundario, por lo que la intensidad que radian las antenas en esa dirección es más pequeña que para el usuario 2.
- **Diagrama de radiación del usuario 3 (azul):** Está compuesto por dos lóbulos principales iguales que apuntan a 0° y 180° y varios lóbulos secundarios, dos de ellos de mayor tamaño y anchura que el resto que apuntan a 90° y -90° . El lóbulo principal apunta hacia el usuario 3, recibiendo la mayor intensidad. Los usuarios 2 y 4 están en la dirección de apuntamiento del máximo de dos lóbulos secundarios, por lo que la intensidad de campo emitida por las antenas no es demasiado pequeña en comparación con las radiaciones recibidas por el resto de usuarios. Los usuarios 1 y 5 reciben la misma intensidad de campo pero cada uno de un



lóbulo secundario, aunque están en la zona de nacimiento de los mismos, por lo que dicha intensidad es muy pequeña.

- **Diagrama de radiación del usuario 4 (amarillo):** Es el dual al diagrama de radiación del usuario 2. El análisis por tanto es equivalente cambiando el usuario 2 por el 4 y el usuario 1 por el 5. El usuario 3 tiene la misma influencia.
- **Diagrama de radiación del usuario 5 (rojo):** Es el dual al diagrama de radiación del usuario 1. El análisis por tanto es equivalente cambiando el usuario 1 por el 5 y el usuario 2 por el 4. El usuario 3 no varía.

El aumento de la directividad ha provocado que para esta configuración hayan aparecido lóbulos secundarios en las direcciones en la que se encuentran los usuarios. Los diagramas de radiación que apuntan a un usuario determinado al estar formado por una mayor cantidad de lóbulos hacen que en las direcciones en las que se encuentran el resto de los usuarios lleguen más interferencias que para la configuración de ocho antenas. La única disminución de interferencias se ha producido del usuario 1 a los usuarios 3 y 4 y del usuario 5 a los usuarios 2 y 3.

5.2.1.2.9. $M=10$

El diagrama de radiación representado corresponde a un sistema formado por un array lineal y uniforme de diez antenas. La figura muestra cinco diagramas de radiación, cada uno de ellos corresponde a la radiación que emite el conjunto de las diez antenas apuntando cada uno hacia el ángulo en el que se encuentra cada uno de los usuarios.

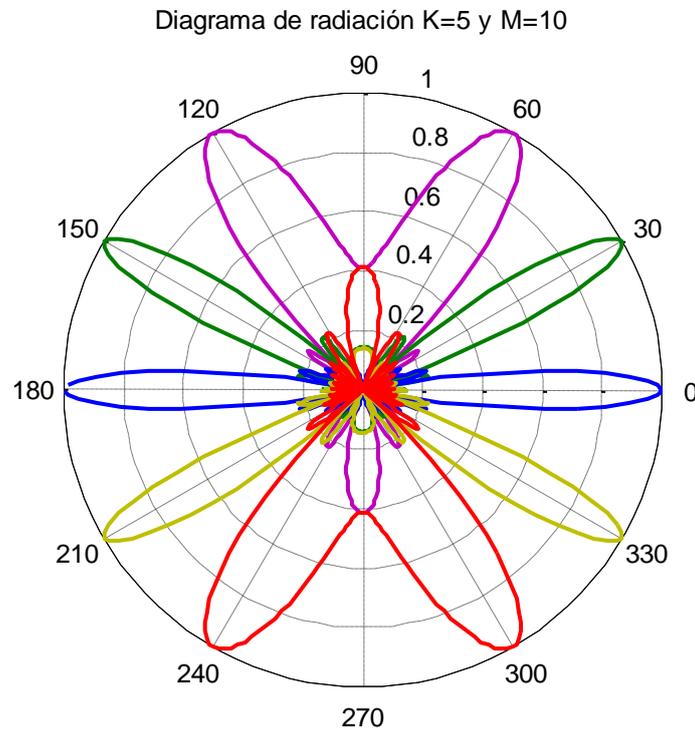


Figura 37: Diagrama de radiación de 5 usuarios y 10 antenas

En la siguiente tabla se muestra el valor del diagrama de radiación normalizado para cada uno de los usuarios respecto al ángulo al que están apuntando las antenas transmisoras.

$K=5$ y $M=10$						
		DR(θ) normalizado				
		Usuario 1	Usuario 2	Usuario 3	Usuario 4	Usuario 5
θ	60°	1	0.0935	0.0880	0.0606	0.2144
	30°	0.0935	1	0.1414	0	0.0606
	0°	0.0880	0.1414	1	0.1414	0.0880
	-30°	0.0606	0	0.1414	1	0.0935
	-60°	0.2144	0.0606	0.0880	0.0935	1

Tabla 19: Valores significativos del diagrama de radiación de 5 usuarios y 10 antenas



Centrándonos en el diagrama de radiación que estamos analizando podemos observar:

- **Diagrama de radiación del usuario 1 (morado):** Está compuesto por tres lóbulos principales, aunque los del semiplano superior están parcialmente unidos. La anchura conjunta de los dos lóbulos del semiplano superior es mayor que la del semiplano inferior, además el del semiplano inferior emite una intensidad bastante menor de campo. Se han estrechado los lóbulos principales y han aparecido más lóbulos secundarios. El lóbulo que apunta hacia 60° donde está situado el usuario 1 tiene en ese ángulo su mayor intensidad. El usuario 2 que se sitúa en 30° se ve influenciado por uno de los lóbulos secundarios del semiplano superior, aunque al ser este lóbulo tan estrecho la intensidad que le llega al usuario 2 es muy pequeña. El usuario 3 se ve influenciado por otro de los lóbulos secundarios, pero se sitúa en una zona cercana al nacimiento del lóbulo por lo que la intensidad de campo en este punto es muy pequeña. El usuario 4 también está apuntado por otro lóbulo secundario en las mismas condiciones que el usuario 3. El usuario 5 es el que mayor intensidad de campo recibe de otro de los lóbulos secundarios en comparación con los usuarios 2, 3 y 4, ya que el máximo de uno de los lóbulos secundarios apunta en su dirección.
- **Diagrama de radiación del usuario 2 (verde):** Está compuesto por dos lóbulos principales. Los lóbulos principales se han estrechado mucho y han aparecido más lóbulos secundarios que son muy estrechos. Han aparecido dos lóbulos secundarios apuntando a 90° y -90° más anchos además de otros lóbulos secundarios menores y más estrechos. El lóbulo del semiplano superior apunta hacia el usuario 1 y 2, siendo la mayor intensidad la que recibe el usuario 2, ya que este diagrama de radiación está diseñado para que apunte hacia él. El usuario 1 recibe poca intensidad debido a que se encuentra al comienzo del lóbulo. El usuario 3 está en la dirección de apuntamiento de uno de los lóbulos secundarios por lo que su intensidad es mayor que la del resto a excepción del usuario 2. El usuario 4 está en una dirección en la que no apunta ninguno de los lóbulos, por lo que no recibe intensidad de campo de las antenas. El usuario 5 está en la zona de nacimiento del lóbulo secundario que apunta a -90° , por lo que la intensidad que radian las antenas en esa dirección es muy pequeña.
- **Diagrama de radiación del usuario 3 (azul):** Está compuesto por dos lóbulos principales iguales que apuntan a 0° y 180° y varios lóbulos secundarios muy estrechos. El lóbulo principal apunta hacia el usuario 3, recibiendo la mayor intensidad. Los usuarios 2 y 4 están en la dirección de apuntamiento de dos lóbulos secundarios iguales recibiendo la misma intensidad de campo. Los usuarios 1 y 5 reciben la misma intensidad de



campo pero cada uno de un lóbulo secundario, están en una zona en la que comienza el lóbulo, por lo que la intensidad recibida por ellos es muy pequeña.

- **Diagrama de radiación del usuario 4 (amarillo):** Es el dual al diagrama de radiación del usuario 2. El análisis por tanto es equivalente cambiando el usuario 2 por el 4 y el usuario 1 por el 5. El usuario 3 tiene la misma influencia.
- **Diagrama de radiación del usuario 5 (rojo):** Es el dual al diagrama de radiación del usuario 1. El análisis por tanto es equivalente cambiando el usuario 1 por el 5 y el usuario 2 por el 4. El usuario 3 no varía.

Al igual que la configuración de nueve antenas, el aumento del número de lóbulos ha aumentado las interferencias, éstas son algo mayores que para la configuración de nueve antenas.

5.2.2. SINR

Es la primera medida que analizaremos para ver las prestaciones del sistema que estamos estudiando.

Estudiaremos varios casos, estos casos van a ser:

1. SINR para tres usuarios en ausencia de ruido con ASD de 360° .
2. SINR para tres usuarios en ausencia de ruido con ASD de 20° .
3. SINR para tres usuarios en presencia de ruido con ASD de 360° .
4. SINR para tres usuarios en presencia de ruido con ASD de 20° .
5. SINR para cinco usuarios en ausencia de ruido con ASD de 360° .
6. SINR para cinco usuarios en ausencia de ruido con ASD de 20° .
7. SINR para cinco usuarios en presencia de ruido con ASD de 360° .
8. SINR para cinco usuarios en presencia de ruido con ASD de 20° .

El ASD es el ángulo de dispersión del canal en transmisión, en las siguientes figuras vamos a ver la comparativa entre el ASD de 360° y el ASD de 20° que influirá en el comportamiento del sistema.

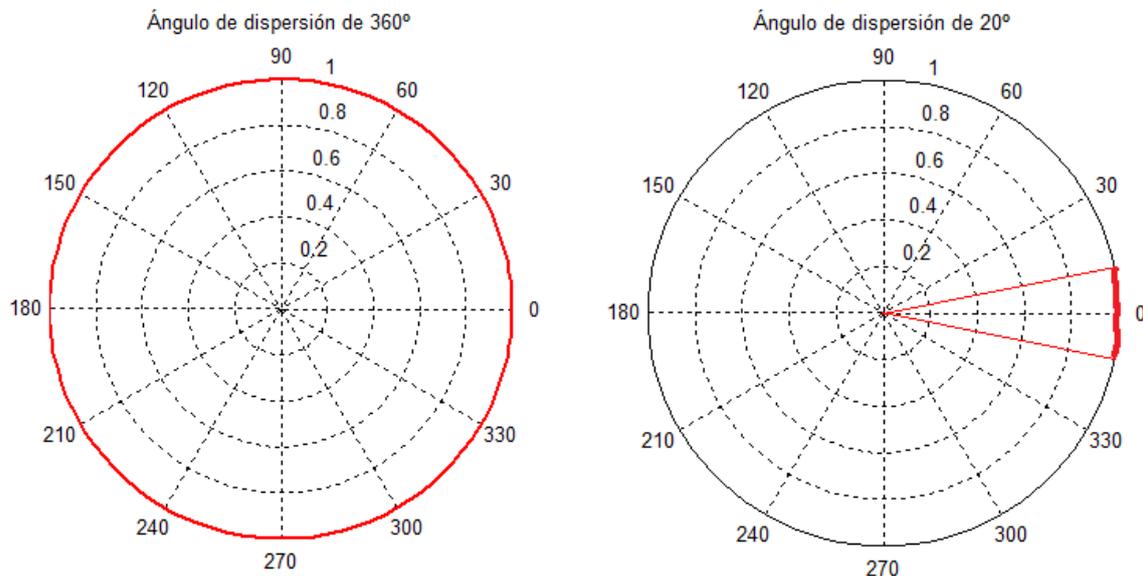


Figura 38: Comparativa ASD, 360° (izquierda), 20° (derecha)

Como podemos ver en las figuras anteriores cuando la dispersión de las antenas es de 360° se produce en todo el espacio y cuando es de 20° sólo tenemos una pequeña área del espacio, lo que producirá diferencias en las prestaciones del sistema.

Antes de analizar los casos que hemos expuesto en el párrafo anterior, cabe fijarnos de nuevo en la formulación de la relación señal a ruido interferencia, ya que las variables que intervienen en el cálculo de esta medida nos darán la clave para analizar el comportamiento del sistema. La formulación de la SINR del usuario i en el enlace descendente, siendo i uno de los K usuarios que hay en el escenario de nuestro sistema es la siguiente:



$$\text{SINR}_i^{\text{DL}}(\mathbf{U}, \mathbf{p}) = \frac{p_i \mathbf{u}_i \mathbf{R}_i \mathbf{u}_i^H}{\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^K p_k \mathbf{u}_k \mathbf{R}_i \mathbf{u}_k^H + \sigma_i^2}$$

Ecuación 40: SINR del usuario i en el enlace descendente

Como vemos el valor de la SINR para cada usuario y para cada una de las distintas configuraciones de número de antenas ($M=[2, 10]$) dependerá de la potencia de la señal transmitida (p_i) que será la misma para todos los usuarios, de la matriz de conformación de haz (referenciaremos a los diagramas de radiación analizados anteriormente), la matriz de covarianza del canal MIMO multiusuario en conformación de haz y del ruido.

5.2.2.1. SINR para tres usuarios en ausencia de ruido

El escenario que vamos a analizar es aquel formado por M antenas transmisoras que varían entre 2 y 10, tres usuarios que se sitúan respecto a las antenas a 45° , 0° y -45° . El sistema no se ve afectado por el ruido, sólo por las interferencias que se producen entre los usuarios.

5.2.2.1.1. $ASD=360^\circ$

La figura que a continuación se presenta representa la SINR en función del número de antenas transmisoras para cada uno de los tres usuarios que tenemos en el escenario que estamos representando. El ángulo de dispersión es de 360° .

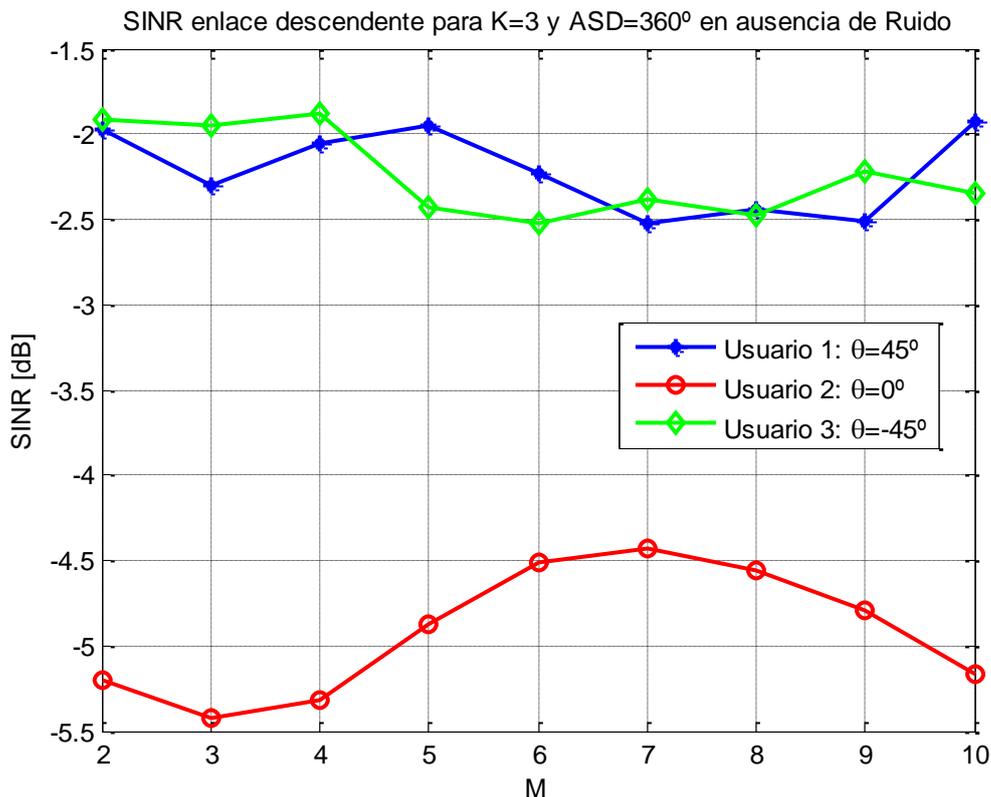


Figura 39: SINR para tres usuarios con ASD de 360° en ausencia de ruido

Los usuarios 1 y 3, al estar situados en las esquinas, se ven menos influenciados por las interferencias, ya que ambos reciben la mayor interferencia del usuario 2 y en menor medida del usuario 3 o el 1 respectivamente. En cambio, el usuario 2 recibe con la misma intensidad la señal interferente del usuario 1 y del 3, ya que se encuentra situado en medio de los dos usuarios. Debido a que la interferencia más elevada es la que sufre el usuario 2, la SINR es menor en relación a los otros dos usuarios. Así mismo, los usuarios 1 y 3, tienen una SINR bastante parecida. La SINR del usuario 2 cae una media de 2.65 dB en relación a la SINR de los usuarios 1 y 3.

A priori, se podía pensar que la SINR para los usuarios 1 y 3 debería ser igual, las diferencias estriban en que la matriz de canal para cada uno de los usuarios es diferente, siendo por tanto distinta la matriz de covarianza con la que se calcula la SINR. Aún así, podemos ver que la SINR varía entorno a los -2 dB y los -2.5 dB para ambos usuarios.

Tras analizar los diagramas de radiación hemos podido ver que la intensidad de radiación que perciben los usuarios 1 y 3 es igual, siendo diferente para el usuario 1. Estas diferencias unidas a las matrices de canal de cada usuario hacen que la SINR de los usuarios 1 y 3 se encuentre en niveles parecidos y que los niveles del usuario 2 sean distintos. Los diagramas de radiación también influyen a la hora de que la SINR no tenga un patrón definido, es decir, por ejemplo que al aumentar el número de antenas aumente la SINR, etc. Esto se debe a que en los puntos en los que hemos situado a nuestros usuarios, los diagramas de radiación no emiten siempre la mayor intensidad de campo, para conseguir eso tendríamos que analizar para cada configuración donde se sitúan los máximos y mínimos para situar a los usuarios en los sitios más óptimos.

Analizamos la SINR para cada uno de los usuarios:

- **Usuario 1 ($\theta=45^\circ$):** La gráfica que conseguimos no tiene tendencia creciente, sino que va variando de momentos crecientes a decrecientes y viceversa. Para 2 antenas comienza en un valor cercano al máximo, decrece para 3 antenas y a partir de ahí comienza a crecer hasta la configuración de 5 antenas donde se sitúa en un punto cercano al máximo, luego decrece hasta mantenerse casi constante para 7, 8 y 9 antenas, aumentando de nuevo para 10 antenas. La SINR varía entre -1.9 dB y -2.5 dB, siendo su máximo y su mínimo respectivamente. El recorrido es de 0.6 dB. La máxima SINR se consigue para la configuración de 10 antenas, aunque un valor muy similar se consigue para 5 antenas. El mínimo se da para la configuración de 7 y 9 antenas, obteniéndose un valor muy similar para 8 antenas.
- **Usuario 2 ($\theta=0^\circ$):** La gráfica presenta una forma parecida a una senoide comenzando en un punto cercano al mínimo que se da para 3 antenas y empezando a crecer hasta llegar al máximo en la configuración de 7 antenas para decrecer de nuevo. La SINR varía entre -4.4 dB y -5.4 dB. El recorrido es de 1 dB. El máximo de -4.4 dB se produce para la configuración de 7 antenas aunque la configuración de 6 antenas que presenta una SINR de -4.5 dB también obtiene un valor óptimo. El mínimo de -5.5 dB se alcanza para la configuración de 3 antenas, estando la configuración de 4 antenas también muy cercana del mínimo, en torno a los -5.3 dB.
- **Usuario 3 ($\theta=-45^\circ$):** La gráfica presenta tendencia constante para las configuraciones con menor número de antenas, a partir de 4 antenas comienza a decrecer, aunque presenta configuraciones en las que

aumenta levemente la SINR respecto al punto mínimo de SINR (-2.5 dB), por lo que las configuraciones con mayor SINR se dan para las configuraciones de 2 a 4 antenas. La SINR varía entre -1.85 dB y -2.5 dB, siendo su recorrido de 0.65 dB. El máximo lo situamos para la configuración de 4 antenas (-1.85 dB) y el mínimo en -2 dB para las configuraciones de 6 y 8 antenas. La configuración de 2 y 3 antenas también se sitúan muy cercanas al máximo.

Tras analizar las gráficas de la SINR para los tres usuarios independientemente podemos ver que el recorrido de las gráficas para el usuario 1 y 3 es menor que para el usuario 2, por tanto el valor de la SINR varía más al cambiar el número de antenas para el usuario 2 que para el 1 y 3, por lo que es más sensible al cambio de configuración.

Para elegir la configuración óptima podríamos tener varios criterios, dependiendo de ello elegiremos una u otra configuración. Analizamos las configuraciones que creemos que son mejores con el criterio asociado:

- **Configuración de 5 antenas:** Es la que tiene un número menor de antenas, por lo que los costes del sistema son menores que la de un número mayor de antenas. Con esta configuración estamos beneficiando al usuario 1 en detrimento del 2 y el 3, ya que en este punto se encuentra el máximo de SINR para el usuario 1. El usuario 3 se encuentra en el mínimo de SINR pero al ser el recorrido muy pequeño no se verá muy afectado. El usuario 2 tiene un valor intermedio de SINR en esta configuración (mitad del recorrido). Las diferencias del valor de SINR no son tantas respecto a otras configuraciones y disminuimos los costes asociados al sistema al tener un número menor de antenas. Esta configuración sería óptima en zonas en la que la mayor densidad de población se encontrara en la situación del usuario 1.
- **Configuración de 6 antenas:** Esta configuración es más equitativa que la de 5 antenas, ya que hemos aumentado considerablemente la SINR del usuario 2, hemos dejado igual la del usuario 3 y hemos disminuido la del 1 a la mitad. Estamos beneficiando más al usuario 2, ya que el usuario 3 obtiene los mismos valores de SINR que en la configuración anterior. Al ser el recorrido pequeño para los usuarios 1 y 3, no les influye tanto, pero esta configuración sí que intensifica la SINR que percibe el usuario 2, estando muy cercana al máximo que puede percibir. Los costes asociados a la implementación de este sistema se verían aumentados debido a que debemos incluir una antena más en la estación base pero el aumento de la SINR del usuario 2 es considerable.
- **Configuración de 7 antenas:** Esta configuración consigue el máximo de SINR del usuario 2, aumenta la SINR del usuario 3 y disminuye la del 1, aunque la diferencia de SINR de los usuarios 1 y 3 es muy pequeña. Respecto a los costes asociados estamos aumentando de nuevo el número



de antenas de la estación base y la SINR que obtenemos son parecidas a las de la configuración de 6 antenas. La ventaja de esta configuración respecto a las otras es que estamos aumentando la SINR del usuario 3, por lo que si la mayor densidad de población se sitúa en la dirección del usuario 3 estaríamos obteniendo una ventaja, ya que aunque el usuario 1 obtenga menor SINR la diferencia no sería muy sustancial.

Por tanto, para sistemas que tengan como limitación el coste deberíamos elegir la configuración de 5 antenas aunque los valores que alcancemos de SINR sean menores. La opción que nos daría mejores resultados respecto a los costes del sistema y prestaciones sería la de 6 antenas, por que conseguimos valores cercanos al máximo para el usuario 2 y los valores para los usuarios 1 y 3 aunque no son los máximos que se pueden obtener, si son mayores que los del usuario 2.

5.2.2.1.2. $ASD=20^\circ$

La figura que a continuación se presenta representa la SINR en función del número de antenas transmisoras para cada uno de los tres usuarios que tenemos en el escenario que estamos representando. El ángulo de dispersión es de 20° .

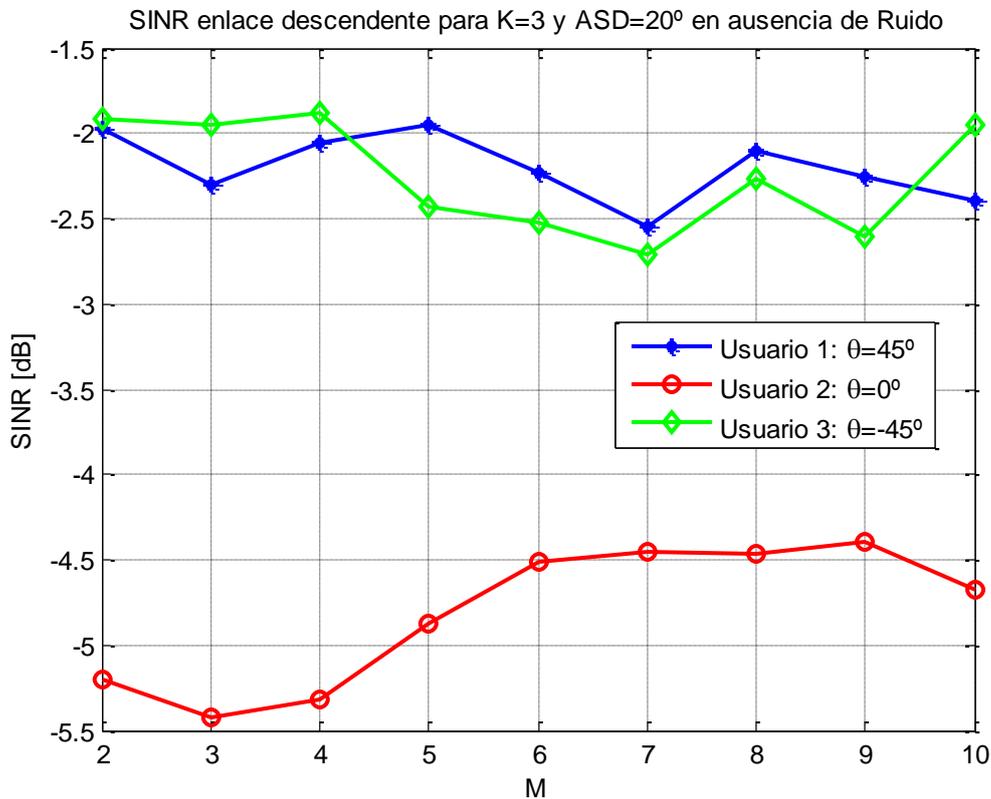


Figura 40: SINR para tres usuarios con ASD de 20° en ausencia de ruido

Los usuarios 1 y 3, al estar situados en las esquinas, se ven menos influenciados por las interferencias, ya que ambos reciben la mayor interferencia del usuario 2 y en menor medida del usuario 3 o el 1 respectivamente. En cambio, el usuario 2 recibe con la misma intensidad la señal interferente del usuario 1 y del 3, ya que se encuentra situado en medio de los dos usuarios. Debido a que la interferencia más elevada es la que sufre el usuario 2, la SINR es menor en relación a los otros dos usuarios. Así mismo, los usuarios 1 y 3, tienen una SINR bastante parecida. La SINR del usuario 2 cae una media de 3dB en relación a la SINR de los usuarios 1 y 3.

Al haber disminuido el ángulo de dispersión (ASD) a 20° , vemos que la SINR del usuario 2 ha aumentado en relación a la SINR para una ASD de 360° , al contrario la SINR ha disminuido para los usuarios 1 y 3 para ciertas configuraciones. Esto se debe a que al disminuir el ángulo de dispersión estamos captando más la señal del usuario 2 y disminuyendo la señal captada para los usuarios 1 y 3, ya que no se encuentran exactamente en la zona cubierta por el ángulo de dispersión, véase *Figura 38*.

A priori, se podría pensar que la SINR para los usuarios 1 y 3 debería ser igual, las diferencias estriban en que la matriz de canal para cada uno de los usuarios es diferente, siendo por tanto distinta la matriz de covarianza con la que se calcula la



SINR. Aún así, podemos ver que la SINR varía entorno a los -2 dB y los -2.6 dB para el usuario 1 y entorno a -1.9 dB y -2.7 dB para el usuario 3, valores muy similares.

Tras analizar los diagramas de radiación hemos podido ver que la intensidad de radiación que perciben los usuarios 1 y 3 es igual, siendo diferente para el usuario 1. Estas diferencias unidas a las matrices de canal de cada usuario hacen que la SINR de los usuarios 1 y 3 se encuentre en niveles parecidos y que los niveles del usuario 2 sean distintos. Los diagramas de radiación también influyen a la hora de que la SINR no tenga un patrón definido, es decir, por ejemplo que al aumentar el número de antenas aumente la SINR, etc. Esto se debe a que en los puntos en los que hemos situado a nuestros usuarios, los diagramas de radiación no emiten siempre la mayor intensidad de campo, para conseguir eso tendríamos que analizar para cada configuración donde se sitúan los máximos y mínimos para situar a los usuarios en los sitios más óptimos.

Analizamos la SINR para cada uno de los usuarios:

- **Usuario 1 ($\theta=45^\circ$):** La gráfica que obtenemos tiene subidas y bajadas teniendo forma de triángulos crecientes y decrecientes. Para 2 antenas comienza en un valor cercano al máximo, decrece para 3 usuarios y a partir de ahí comienza a crecer hasta la configuración de 5 antenas donde se sitúa en el máximo, luego decrece hasta llegar al mínimo que se da para la configuración de 7 antenas, aumenta de nuevo para 8 antenas y vuelve a disminuir para 9 y 10 antenas. La SINR varía entre -2 dB y -2.6 dB, siendo su máximo y su mínimo respectivamente. El recorrido es de 0.6 dB. La máxima SINR se consigue para la configuración de 5 antenas, aunque para 4 antenas se consigue una SINR bastante buena. El mínimo se da para la configuración de 7 antenas.
- **Usuario 2 ($\theta=0^\circ$):** La gráfica presenta una caída al principio para 3 antenas y comienza a crecer, sólo decrece el valor aunque muy poco para 10 antenas. La SINR varía entre -4.35 dB y -5.4 dB. El recorrido es de 2 dB. El máximo de -4.35 dB se produce para la configuración de 9 antenas aunque la configuración de 7 y 8 antenas que presenta una SINR de -4.45 dB también obtienen un valor óptimo. El mínimo de -5.4 dB se alcanza para la configuración de 3 antenas, estando la configuración de 4 antenas también muy cercana al mínimo, en torno a los -5.3 dB.
- **Usuario 3 ($\theta=-45^\circ$):** La gráfica presenta tendencia constante para las configuraciones con menor número de antenas, a partir de 4 antenas comienza a decrecer hasta llegar al mínimo para la configuración de 7 antenas, crece para 8 antenas vuelve a disminuir para 9 y a aumentar para 10. Las configuraciones con mayor SINR se dan para las configuraciones de 2 a 4 antenas. La SINR varía entre -1.85 dB y -2.7 dB, siendo su recorrido de 0.85 dB. El máximo lo situamos para la configuración de 4 antenas (-1.85 dB) y el mínimo en -2.7 dB para la configuración de 7



antenas. La configuración de 2 y 3 antenas también se sitúan muy cercanas al máximo.

Tras analizar las gráficas de la SINR para los tres usuarios independientemente podemos ver que el recorrido de las gráficas para el usuario 1 y 3 es menor que para el usuario 2, por tanto el valor de la SINR varía más al cambiar el número de antenas para el usuario 2 que para el 1 y 3, por lo que es más sensible al cambio de configuración.

Para elegir la configuración óptima podríamos tener varios criterios, dependiendo de ello elegiremos una u otra configuración. Analizamos las configuraciones que creemos que son mejores con el criterio asociado:

- **Configuración de 6 antenas:** Es la que tiene un número menor de antenas, por lo que los costes del sistema son menores que la otra elegida que es de 8 antenas. Con esta configuración estamos beneficiando al usuario 1 en detrimento del 2 y el 3, ya que aunque en este punto no se encuentre el máximo de SINR para el usuario 1, es mayor su SINR (-2.25 dB) que la del usuario 3 (-2.5 dB), aunque esta diferencia es de 0.25 dB. El usuario 2 tiene un valor cercano al máximo (-4.5 dB). Las diferencias del valor de SINR no son tantas respecto a otras configuraciones y disminuimos los costes asociados al sistema al tener un número menor de antenas, por lo que priorizamos el coste del sistema en detrimento de una menor SINR.
- **Configuración de 8 antenas:** Esta configuración es más equitativa que la anterior debido a que la diferencia entre la SINR del usuario 1 y 3 es de 0.1 dB, siendo mayor la SINR del usuario 1 (-2.15 dB) que la del usuario 3 (-2.25 dB). También hemos aumentado un poco (0.1 dB) la SINR del usuario 2 (-4.4 dB). Estamos beneficiando a los tres usuarios con esta configuración porque hemos aumentado la SINR de los tres usuarios, pero hemos aumentado los costes del sistema incluyendo dos antenas más a la estación base.

Por tanto, para sistemas que tengan como limitación el coste deberíamos elegir la configuración de 6 antenas, ya que aunque la SINR es algo menor que la configuración de 8 antenas estas diferencias no son muy grandes (usuario 1: de -2.25 dB a -2.15 dB, usuario 2: de -4.5 dB a -4.4 dB y usuario 3: de -2.5 dB a -2.25 dB). Si necesitáramos valores más altos de SINR deberíamos elegir la configuración de 8 antenas.

5.2.2.2. SINR para tres usuarios en presencia de ruido

El escenario que vamos a analizar es aquel formado por M antenas transmisoras que varían entre 2 y 10, tres usuarios que se sitúan respecto a las antenas a 45° , 0° y -45° . Este sistema se ve afectado por el ruido, además de por las interferencias que se producen entre los usuarios. La potencia del ruido presente en el sistema es de 1 W.

La diferencia entre las gráficas del apartado anterior y éste radica en que existe ruido en el sistema que hará que la señal no se reciba con tanta potencia como en el caso ideal en el que no hay ruido en el sistema. En este caso también analizaremos los casos en los que el ASD sea 360° y 20° .

5.2.2.2.1. ASD= 360°

La figura que a continuación se presenta representa la SINR en función del número de antenas transmisoras para cada uno de los tres usuarios que tenemos en el escenario que estamos representando en presencia de ruido (la potencia de ruido es de 1 W). El ángulo de dispersión es de 360° .

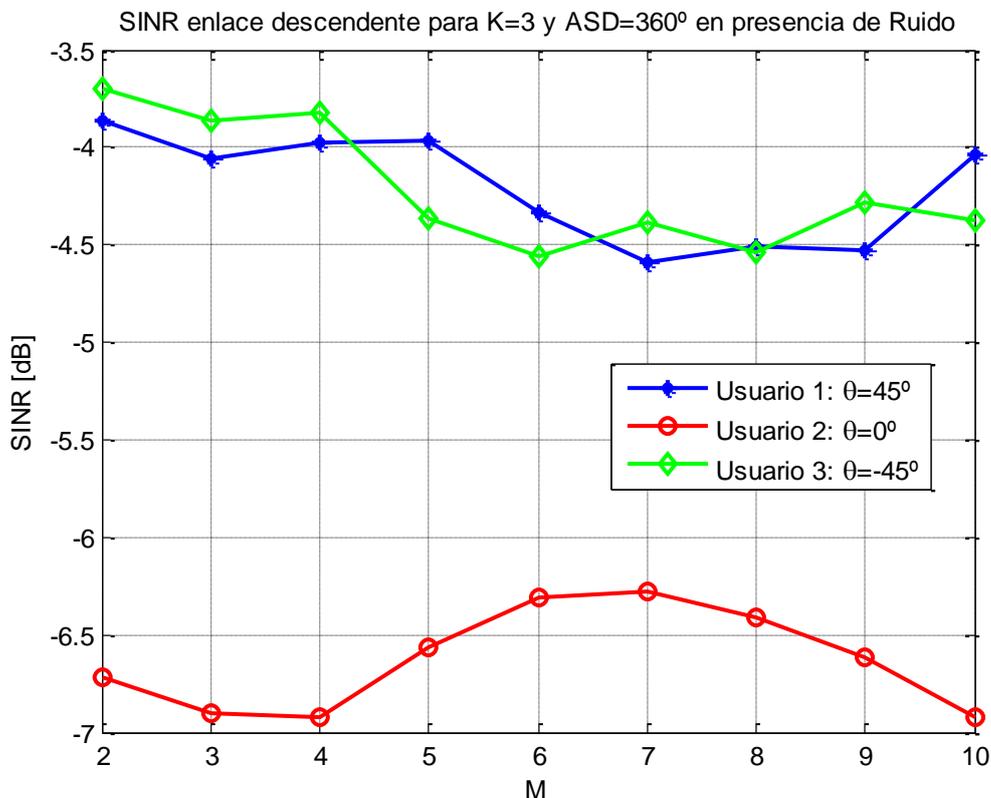


Figura 41: SINR para tres usuarios con ASD de 360° en presencia de ruido

Al igual que su gráfica homóloga del apartado anterior en la que no había ruido en el sistema, las interferencias entre usuarios sigue siendo la misma. Los usuarios 1 y 3, al estar situados en las esquinas, se ven menos influenciados por las interferencias, ya que ambos reciben la mayor interferencia del usuario 2 y en menor medida del usuario 3



o el 1 respectivamente. En cambio, el usuario 2 recibe con la misma intensidad la señal interferente del usuario 1 y del 3, ya que se encuentra situado en medio de los dos usuarios. Debido a que la interferencia más elevada es la que sufre el usuario 2, la SINR es menor en relación a los otros dos usuarios. Así mismo, los usuarios 1 y 3, tienen una SINR bastante parecida. La SINR del usuario 2 cae una media de 2.4 dB en relación a la SINR de los usuarios 1 y 3.

Al existir ruido en el sistema, la SINR ha disminuido unos 2 dB para los usuarios 1 y 3 y unos 1.7 dB para el usuario 2. Por tanto, el ruido disminuye considerablemente la SINR.

A priori, se podía pensar que la SINR para los usuarios 1 y 3 debería ser igual, las diferencias estriban en que la matriz de canal para cada uno de los usuarios es diferente, siendo por tanto distinta la matriz de covarianza con la que se calcula la SINR. Aún así, podemos ver que la SINR varía entorno a los -3.7 dB y los -4.6 dB para ambos usuarios.

Tras analizar los diagramas de radiación hemos podido ver que la intensidad de radiación que perciben los usuarios 1 y 3 es igual, siendo diferente para el usuario 1. Estas diferencias unidas a las matrices de canal de cada usuario hacen que la SINR de los usuarios 1 y 3 se encuentre en niveles parecidos y que los niveles del usuario 2 sean distintos. Los diagramas de radiación también influyen a la hora de que la SINR no tenga un patrón definido, es decir, por ejemplo que al aumentar el número de antenas aumente la SINR, etc. Esto se debe a que en los puntos en los que hemos situado a nuestros usuarios, los diagramas de radiación no emiten siempre la mayor intensidad de campo, para conseguir eso tendríamos que analizar para cada configuración donde se sitúan los máximos y mínimos para situar a los usuarios en los sitios más adecuados.

Analizamos la SINR para cada uno de los usuarios:

- **Usuario 1 ($\theta=45^\circ$):** La gráfica que obtenemos tiene una tendencia descendente a medida que aumenta el número de antenas, sólo aumenta para la configuración de 10 antenas, aunque se mantiene más o menos constante en las configuraciones de 2 a 5 antenas. El máximo lo obtenemos para la configuración de 2 antenas (-3.8 dB), aunque para 5 antenas también obtenemos un valor óptimo cercano al máximo. El mínimo se obtiene para la configuración de 7 antenas y tiene un valor de -4.6 dB. Por tanto, la SINR varía entre -3.8 dB y -4.6 dB, siendo su máximo y su mínimo respectivamente. El recorrido es de 0.8 dB.
- **Usuario 2 ($\theta=0^\circ$):** La gráfica presenta una forma parecida a una senoide comenzando en un punto cercano al mínimo que se da para 4 antenas y empezando a crecer hasta llegar al máximo en la configuración de 7 antenas para decrecer de nuevo. La SINR varía entre -6.25 dB y -6.9 dB. El recorrido es de 0.65 dB. El máximo de -6.25 dB se produce para la configuración de 7 antenas aunque la configuración de 6 antenas que

presenta una SINR de -6.5 dB también obtiene un valor óptimo. El mínimo de -6.9 dB se alcanza para la configuración de 4 antenas, estando la configuración de 3 antenas también muy cercana al mínimo, en torno a los -6.85 dB.

- **Usuario 3 ($\theta=-45^\circ$):** La gráfica presenta tendencia constante para las configuraciones con menor número de antenas, a partir de 4 antenas comienza a decrecer, hasta llegar al mínimo que se da para la configuración de 6 antenas, a partir de ahí se van alternando crecimiento y decrecimientos leves. La SINR varía entre -3.7 dB y -4.6 dB, siendo su recorrido de 0.9 dB. El máximo lo situamos para la configuración de 2 antenas (-3.7 dB) y el mínimo en -4.6 dB para la configuración de 6 antenas. Las configuraciones de 3 y 4 antenas también se sitúan muy cercanas al máximo, al igual que la de 8 y 9 al mínimo.

Tras analizar las gráficas de la SINR para los tres usuarios independientemente podemos ver que el recorrido de las gráficas para el usuario 1 y 3 es algo mayor que para el usuario 2. Comparando con la gráfica en la que no había ruido en el sistema, vemos que la SINR tiene una mayor variabilidad para los usuarios 1 y 3.

Para elegir la configuración más adecuada podríamos tener varios criterios, dependiendo de ello elegiremos una u otra configuración. Analizamos las configuraciones que creemos que son mejores:

- **Configuración de 5 antenas:** Es la que tiene un menor número de antenas, por lo que los costes del sistema son menores que si elegimos una configuración con un número mayor de antenas. Con esta configuración estamos beneficiando al usuario 1 en detrimento del 2 y el 3, ya que en este punto se encuentra cercano al máximo de SINR para el usuario 1 (-4 dB). El usuario 3 se encuentra en un punto intermedio (-4.4 dB), por lo que la SINR del usuario 3 es 0.4 dB menor que la del 1. El usuario 2 tiene un valor intermedio de SINR en esta configuración (mitad del recorrido), se encuentra en torno a los -6.6 dB. Las diferencias del valor de SINR no son tantas respecto a otras configuraciones y disminuimos los costes asociados al sistema al tener un número menor de antenas. Esta configuración sería óptima en zonas en la que la mayor densidad de población se encontrara en la zona del usuario 1.
- **Configuración de 6 antenas:** Esta configuración es más equitativa que la de 5 antenas, ya que hemos aumentado la SINR del usuario 2 y 3, y en contrapartida hemos disminuido la del usuario 1. Con esto conseguimos que las diferencias entre ellos sean menores. La mayor ganancia la experimenta el usuario 2 porque pasa de -6.6 dB a -6.35 dB, estando muy cercana al máximo que puede percibir. El valor de la SINR para el usuario 1 es de -4.35 dB y para el 3 de -4.6 dB, poca diferencia entre ellos. Los costes asociados a la implementación de este sistema se verían



aumentados debido a que debemos incluir una antena más en la estación base pero el aumento de la SINR del usuario 2 y 3 es para tenerlo en cuenta, mereciendo la pena incluir esta nueva antena.

- **Configuración de 7 antenas:** Esta configuración consigue el máximo de SINR del usuario 2. En este caso invertimos los papeles del usuario 1 y 3, aumentando la SINR del usuario 3 y disminuyendo la del usuario 1. Los valores de la SINR que obtenemos con esta configuración serán de -4.6 dB para el usuario 1, -6.25 dB para el 2 y -4.4 dB para el 3. Respecto a los costes asociados estamos aumentando de nuevo el número de antenas de la estación base y la SINR que obtenemos son parecidas a las de la configuración de 6 antenas. La ventaja de esta configuración respecto a las otras es que estamos aumentando la SINR del usuario 2 e intercambiando los papeles del usuario 1 y 3, dependerá de nuestras necesidades la conveniencia de elegir esta configuración.

Por tanto, para sistemas que tengan como limitación el coste deberíamos elegir la configuración de 5 antenas aunque los valores que alcancemos de SINR sean menores. La opción que nos daría mejores resultados respecto a los costes del sistema y prestaciones sería la de 6 antenas, porque conseguimos valores cercanos al máximo para el usuario 2 y los valores para los usuarios 1 y 3 aunque no son los máximos que se pueden obtener si son mayores que los del usuario 2.

Comparando con el sistema en el que no había ruido, las configuraciones que elegiríamos serían las mismas, por lo que aunque tengamos ruido en el sistema nos valdrían las mismas configuraciones, aunque la señal que se recibirá habrá disminuido debido a la presencia del ruido en el sistema.

5.2.2.2.2. $ASD=20^\circ$

La figura que a continuación se presenta representa la SINR en función del número de antenas transmisoras para cada uno de los tres usuarios que tenemos en el escenario que estamos representando en presencia de ruido (la potencia de ruido es de 1 W). El ángulo de dispersión es de 20° .

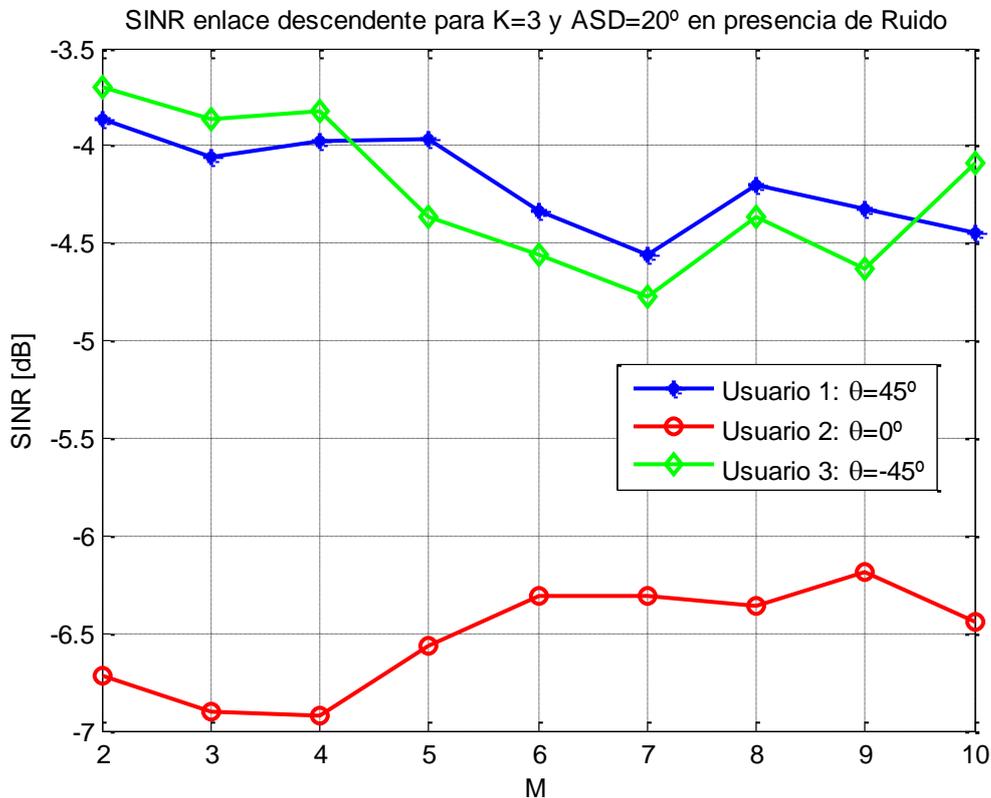


Figura 42: SINR para tres usuarios con ASD de 20° en presencia de ruido

Al igual que su gráfica homóloga del apartado 5.2.2.1.2 en el que no había ruido en el sistema (Figura 40), las interferencias entre usuarios sigue siendo la misma. Los usuarios 1 y 3, al estar situados en las esquinas, se ven menos influenciados por las interferencias, ya que ambos reciben la mayor interferencia del usuario 2 y en menor medida del usuario 3 o el 1 respectivamente. En cambio, el usuario 2 recibe con la misma intensidad la señal interferente del usuario 1 y del 3, ya que se encuentra situado en medio de los dos usuarios. Debido a que la interferencia más elevada es la que sufre el usuario 2, la SINR es menor en relación a los otros dos usuarios. Así mismo, los usuarios 1 y 3, tienen una SINR bastante parecida. La SINR del usuario 2 cae una media de 2.4 dB en relación a la SINR de los usuarios 1 y 3.

Al haber disminuido el ángulo de dispersión (ASD) a 20° , vemos que la SINR del usuario 2 ha aumentado en relación a la SINR para una ASD de 360° , al contrario la SINR ha disminuido para los usuarios 1 y 3 para ciertas configuraciones. Esto se debe a que al disminuir el ángulo de dispersión estamos captando más la señal del usuario 2 y disminuyendo la señal captada para los usuarios 1 y 3, ya que no se encuentra exactamente en la zona cubierta por el ángulo de dispersión, véase Figura 38.



A priori, se podía pensar que la SINR para los usuarios 1 y 3 debería ser igual, las diferencias estriban en que la matriz de canal para cada uno de los usuarios es diferente, siendo por tanto distinta la matriz de covarianza con la que se calcula la SINR. Aún así, podemos ver que la SINR varía entorno a los -3.8 dB y los -4.9 dB para el usuario 1 y entorno a -3.7 dB y -4.75 dB para el usuario 3, valores muy similares.

Tras analizar los diagramas de radiación hemos podido ver que la intensidad de radiación que perciben los usuarios 1 y 3 es igual, siendo diferente para el usuario 1. Estas diferencias unidas a las matrices de canal de cada usuario hacen que la SINR de los usuarios 1 y 3 se encuentre en niveles parecidos y que los niveles del usuario 2 sean distintos. Los diagramas de radiación también influyen a la hora de que la SINR no tenga un patrón definido, es decir, por ejemplo que al aumentar el número de antenas aumente la SINR, etc. Esto se debe a que en los puntos en los que hemos situado a nuestros usuarios, los diagramas de radiación no emiten siempre la mayor intensidad de campo, para conseguir eso tendríamos que analizar para cada configuración donde se sitúan los máximos y mínimos para situar a los usuarios en los sitios más óptimos.

Analizamos la SINR para cada uno de los usuarios:

- **Usuario 1 ($\theta=45^\circ$):** La gráfica se mantiene casi constante para las configuraciones de 2 a 5 antenas. Al aumentar las antenas comienza a disminuir hasta el mínimo que se da para la configuración de 7 antenas, creciendo de nuevo para 8 y decreciendo para 9 y 10 antenas. La SINR varía entre -3.8 dB y -4.9 dB, siendo su máximo y su mínimo respectivamente. El recorrido es de 1.05 dB. La máxima SINR se consigue para la configuración de 2 antenas, aunque para 4 y 5 antenas se consiguen valores de la SINR bastante buenos. El mínimo se da para la configuración de 7 antenas.
- **Usuario 2 ($\theta=0^\circ$):** La gráfica presenta una caída hasta la configuración de 4 antenas donde comienza a crecer manteniéndose casi constante para 6, 7 y 8 antenas y creciendo de nuevo para 9 antenas, para disminuir para la configuración de 10 antenas. La SINR varía entre -6.2 dB y -6.9 dB. El recorrido es de 0.7 dB. El máximo de -6.2 dB se produce para la configuración de 9 antenas. El mínimo de -6.9 dB se alcanza para la configuración de 4 antenas, estando la configuración de 3 antenas también muy cercana al mínimo, en torno a los -6.85 dB.
- **Usuario 3 ($\theta=-45^\circ$):** La gráfica presenta tendencia constante para las configuraciones con menor número de antenas, a partir de 4 antenas comienza a decrecer hasta llegar al mínimo para la configuración de 7 antenas, crece para 8 antenas vuelve a disminuir para 9 y a aumentar para 10. Las configuraciones con mayor SINR se dan para las configuraciones de 2 a 4 antenas. La SINR varía entre -3.7 dB y -4.75 dB, siendo su recorrido de 1.05 dB. El máximo lo situamos para la configuración de 2 antenas (-3.7 dB) y el mínimo en -4.75 dB para la configuración de 7

antenas. La configuración de 3 y 4 antenas también se sitúan muy cercanas al máximo.

Tras analizar las gráficas de la SINR para los tres usuarios independientemente podemos ver que el recorrido de las gráficas para el usuario 1 y 3 es mayor que para el usuario 2, pero sus valores son mayores que para el usuario 2.

Para elegir la configuración más adecuada podríamos tener varios criterios, dependiendo de ello elegiremos una u otra configuración. Analizamos las configuraciones que creemos que son mejores con el criterio asociado:

- **Configuración de 5 antenas:** Es la que tiene un número menor de antenas, por lo que los costes del sistema son menores que las otras opciones elegidas. Con esta configuración estamos beneficiando al usuario 1 en detrimento del 2 y el 3, ya que aunque en este punto no se encuentre el máximo de SINR para el usuario 1, es mayor su SINR (-4 dB) que la del usuario 3 (-4.45 dB), siendo la diferencia de 0.45 dB. El usuario 2 tiene un valor cercano a la mitad del recorrido de la gráfica (-6.6 dB). Las diferencias del valor de SINR no son tantas respecto a otras configuraciones y disminuimos los costes asociados al sistema al tener un número menor de antenas, por lo que priorizamos el coste del sistema en detrimento de un valor más óptimo de la SINR.
- **Configuración de 8 antenas:** Esta configuración es más equitativa que la anterior debido a que la diferencia entre la SINR del usuario 1 y 3 es de 0.1 dB, siendo mayor la SINR del usuario 1 (-4.2 dB) que la del usuario 3 (-4.3 dB). El mayor aumento es el que corresponde al usuario 2, ya que en este caso la SINR tiene un valor de -6.35 dB, aumentando 0.25 dB respecto a la configuración de 5 antenas. Estamos beneficiando a los usuarios 2 y 3, y perjudicando al 1, pero esto permite ser más equitativo en la SINR media que obtienen los usuarios. Hemos aumentado los costes del sistema considerablemente, ya que hemos incluido 3 antenas más a la estación base.
- **Configuración de 9 antenas:** Con esta configuración lo que conseguimos es aumentar el valor de la SINR para el usuario 2 hasta su nivel máximo (-6.2 dB). En contrapartida disminuimos la SINR para los usuarios 1 y 3 siendo respectivamente de -4.3 dB y de -4.65 dB. De esta forma acercamos más los valores de la SINR de los tres usuarios. Esta configuración no obtiene una ganancia tan significativa del usuario 2 pero sí que disminuimos la SINR de los otros dos usuarios, pero es importante seleccionarla por si lo que queremos conseguir es una SINR más uniforme para los tres usuarios. Los costes del sistema han aumentado considerablemente respecto a la configuración de 5 antenas y en mucha menor medida para la de 8 antenas.



Por tanto, para sistemas que tengan como limitación el coste deberíamos elegir la configuración de 5 antenas. Si los costes no suponen un punto limitante en el diseño, conseguimos mejores prestaciones con la configuración de 8 antenas. La configuración de 9 antenas sería la opción para un diseño muy concreto.

Comparando con el sistema en el que no había ruido, sólo coincidiríamos en la configuración de 8 antenas, porque el ruido en este caso ha hecho que varíen las prestaciones del sistema para el resto de configuraciones.

5.2.2.3. SINR para cinco usuarios en ausencia de ruido

El escenario que vamos a analizar es aquel formado por M antenas transmisoras que varían entre 2 y 10, cinco usuarios que se sitúan respecto a las antenas a 60° , 30° , 0° , -30° y -60° . El sistema no se ve afectado por el ruido, sólo por las interferencias que se producen entre los usuarios.

5.2.2.3.1. $ASD=360^\circ$

La gráfica que a continuación se presenta representa la SINR en función del número de antenas transmisoras para cada uno de los cinco usuarios que tenemos en el sistema. El ángulo de dispersión es de 360° .

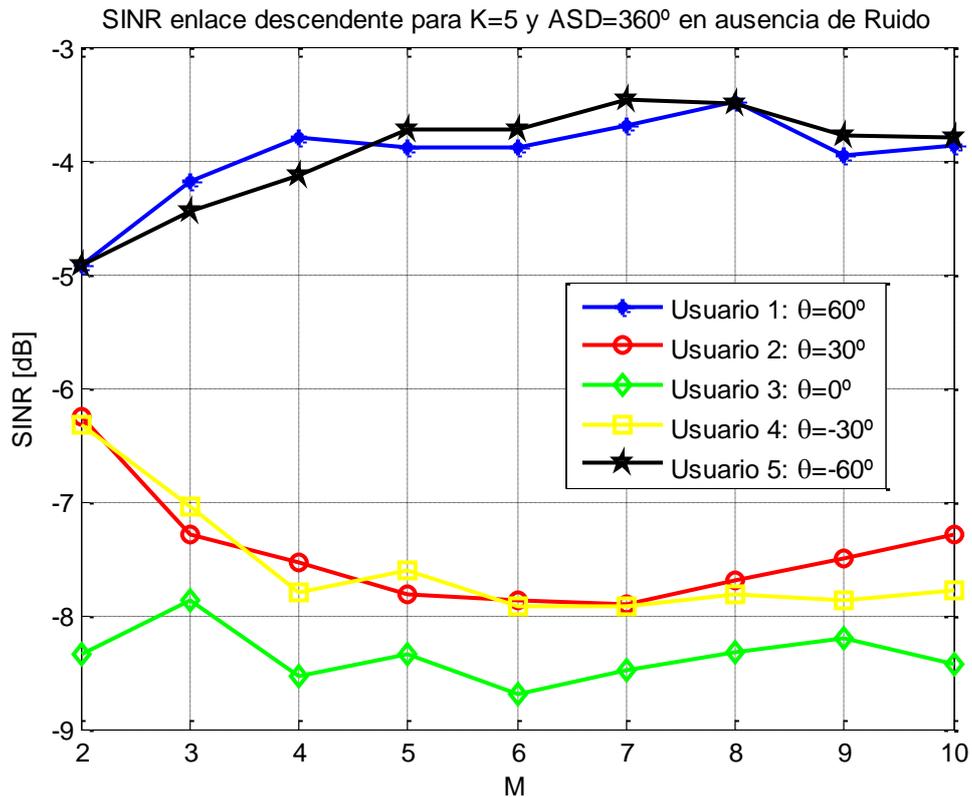


Figura 43: SINR para cinco usuarios con ASD de 360° en ausencia de ruido

Los usuarios 1 y 5, al estar situados en las esquinas, se ven menos influenciados por las interferencias, ya que ambos reciben la mayor interferencia del usuario 2 y 4 respectivamente y en menor medida del resto de los usuarios. Los usuarios 2 y 4 se ven influenciados en la misma medida por los usuarios 1 y 3 y 3 y 5 respectivamente, por lo que al tener una interferencia mayor, la SINR disminuirá respecto a los usuarios 1 y 5. El usuario 3 se ve influenciado por los otros cuatro usuarios, sobre todo le afectará la interferencia de los usuarios 2 y 4, siendo menor su SINR que la del resto. La SINR de los usuarios 2 y 4 cae una media de 2.85 dB respecto a los usuarios 1 y 5. La SINR del usuario 3 cae 4.15 dB respecto a los usuarios 1 y 5 y 1.3 dB respecto a los usuarios 2 y 4.



La SINR para los usuarios 1 y 5 y para los usuarios 2 y 4 son muy parecidas debido a que se encuentran simétricos respecto al plano horizontal. Las diferencias que hay se deben a que la matriz de canal para cada uno de los usuarios es diferente, siendo por tanto distinta la matriz de covarianza con la que se calcula la SINR.

Los diagramas de radiación justifican las formas de las gráficas de las SINR que obtenemos para 5 usuarios, ya que al aumentar el número de usuarios, la intensidad de campo se ha tenido que distribuir a un número mayor de usuarios. La situación de los usuarios ha influido también porque en algunos de los puntos en los que se sitúan los usuarios llegaba muy poca intensidad de campo, en ocasiones nula, sobre todo para los usuarios centrales (2, 3 y 4). En el análisis de los diagramas de radiación que hemos comentado anteriormente se detalla toda la información.

La disminución de los valores de la SINR respecto a los que obteníamos para la configuración de 3 usuarios en ausencia de ruido y con ASD de 360° se debe también a los diagramas de radiación, ya que la señal se ha tenido que distribuir a un mayor número de direcciones, además de aumentar la interferencia en el sistema.

Analizamos la SINR para cada uno de los usuarios:

- **Usuario 1 ($\theta=60^\circ$):** La gráfica tiene tendencia creciente hasta la configuración de 8 antenas donde comienza a descender. La SINR varía entre -3.3 dB y -4.9 dB, siendo su máximo y su mínimo respectivamente. El recorrido es de 1.5 dB, por lo que varía bastante el valor de la SINR con las diferentes configuraciones. La máxima SINR se consigue para la configuración de 8 antenas. El mínimo se da para la configuración de 2 antenas.
- **Usuario 2 ($\theta=30^\circ$):** La gráfica presenta una tendencia descendente hasta 7 antenas donde comienza a ascender. Esta tendencia descendente se debe a que el aumento del número de antenas hace que los diagramas de radiación sean más directivos, disminuyendo la señal que percibe este usuario, porque en la mayoría de las configuraciones en esta dirección se sitúan lóbulos muy pequeños o coinciden con el nacimiento de algún lóbulo no percibiendo casi señal en esta dirección. La SINR varía entre -6.2 dB y -7.9 dB. El recorrido es de 1.7 dB. El máximo de -6.2 dB se produce para la configuración de 2 antenas. El mínimo de -7.9 dB se alcanza para la configuración de 7 antenas, estando la configuración de 6 antenas también muy cercana al mínimo, en torno a los -7.8 dB.
- **Usuario 3 ($\theta=0^\circ$):** La gráfica alterna máximos y mínimos relativos entre las configuraciones de 2 y 6 antenas. A partir de 6 antenas comienza a crecer hasta que desciende para 10 antenas. La SINR varía entre -7.85 dB y -8.75 dB, siendo su recorrido de 0.9 dB. El menor recorrido en este usuario se debe a que los diagramas de radiación se mantenían más o menos en la misma línea en esta dirección al aumentar el número de



antenas, por lo que la poca variabilidad de la gráfica se debe a ello. El máximo lo situamos para la configuración de 3 antenas (-7.85 dB) y el mínimo en -8.75 dB para la configuración de 6 antenas.

- **Usuario 4 ($\theta=-30^\circ$):** La gráfica presenta una tendencia descendente, aunque aumenta puntualmente para la configuración de 5 antenas. Esta tendencia descendente lo podemos justificar gracias a los diagramas de radiación como lo hemos hecho para el usuario 2. La SINR varía entre -6.3 dB y -7.9 dB. El recorrido es de 1.6 dB. El máximo de -6.3 dB se produce para la configuración de 2 antenas. El mínimo de -7.9 dB se alcanza para las configuraciones de 6 y 7 antenas.
- **Usuario 5 ($\theta=-60^\circ$):** La gráfica tiene tendencia creciente hasta la configuración de 7 antenas donde comienza a descender. La SINR varía entre -3.35 dB y -4.9 dB, siendo su máximo y su mínimo respectivamente. El recorrido es de 1.55 dB, por lo que varía bastante el valor de la SINR con las diferentes configuraciones. La máxima SINR se consigue para la configuración de 7 antenas. El mínimo se da para la configuración de 2 antenas.

Tras analizar las gráficas de la SINR para los cinco usuarios independientemente podemos ver que el recorrido de las gráficas para el usuario 1, 2, 4 y 5 es mucho mayor que para el usuario 3, esto se debe a que los diagramas de radiación no apuntan con intensidades de campo muy distintas para cada configuración variando mucho el valor de la SINR.

Para cinco usuarios es más difícil elegir la configuración más adecuada, ya que si beneficiamos a los usuarios 1 y 5 estamos perjudicando a los usuarios 2, 3 y 4, ya que la tendencia de las gráficas es distinta, para los primeros crece al aumentar el número de antenas y para los segundos decrece. Analizamos las configuraciones que creemos que son más equitativas con todos los usuarios:

- **Configuración de 3 antenas:** Es la que tiene un número menor de antenas, por lo que los costes del sistema son menores que la de un número mayor de antenas. Con esta configuración estamos beneficiando a los usuarios 2, 3 y 4 ya que estamos cogiendo una configuración en la que su SINR es de las más altas en detrimento del 1 y el 5. Hay que ver también que la SINR es menor de todas formas para los usuarios 2, 3 y 4, ya que los valores más altos que se alcanzan son siempre menores que para el 1 y el 5, por las causas analizadas anteriormente. Los valores de la SINR para esta configuración son -4.2 dB para el usuario 1, -7.3 dB para el 2, -7.75 dB para el 3, -7 dB para el 4 y -4.5 dB para el 5.
- **Configuración de 5 antenas:** Esta configuración beneficia más a la SINR de los usuarios 1 y 5, escogiendo valores cercanos al máximo en detrimento del resto de los usuarios. Aún así, se ha intentado escoger una



configuración en la que los usuarios 2, 3 y 4 no se sitúen en mínimos sino en unos valores intermedios. El coste de este sistema es mayor debido a que aumentamos en dos el número de antenas del sistema por estación base. Los valores de la SINR para esta configuración son de -3.85 dB para el usuario 1, 7.8 dB para el 2, -8.3 dB para el 3, -7.7 dB para el 4 y -3.7 dB para el 5.

La configuración más equitativa sería la de 3 antenas, ya que aunque disminuimos la SINR para los usuarios 1 y 5 estamos consiguiendo una SINR más alta para los usuarios 2, 3 y 4. Además este sistema nos saldría más económico ya que nos ahorraríamos el gasto de dos antenas más por estación base.

5.2.2.3.2. $ASD=20^\circ$

La gráfica que a continuación se presenta representa la SINR en función del número de antenas transmisoras para cada uno de los cinco usuarios que tenemos en el sistema. El ángulo de dispersión es de 20° .

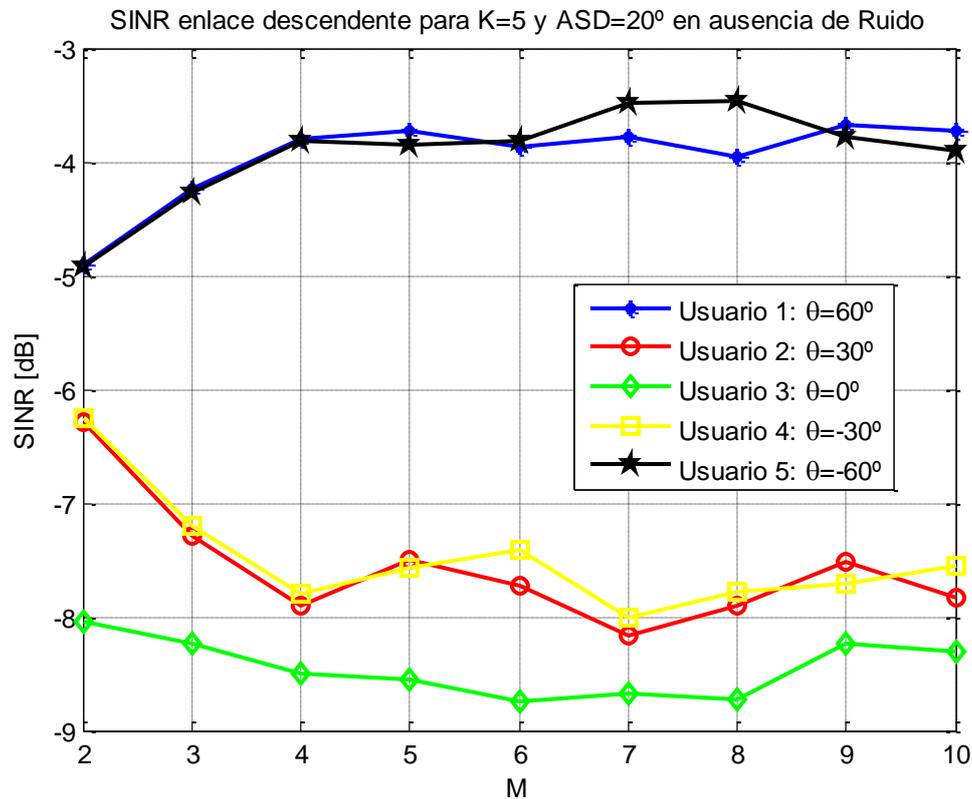


Figura 44: SINR para cinco usuarios con ASD de 20° en ausencia de ruido

Los usuarios 1 y 5, al estar situados en las esquinas, se ven menos influenciados por las interferencias, ya que ambos reciben la mayor interferencia del usuario 2 y 4 respectivamente y en menor medida del resto de los usuarios. Los usuarios 2 y 4 se ven influenciados en la misma medida por los usuarios 1 y 3 y 3 y 5 respectivamente, por lo que al tener una interferencia mayor, la SINR disminuirá respecto a los usuarios 1 y 5. El usuario 3 se ve influenciado por los otros cuatro usuarios, sobre todo le afectará la interferencia de los usuarios 2 y 4, siendo menor su SINR que la del resto. La SINR de los usuarios 2 y 4 cae una media de 3.1 dB respecto a los usuarios 1 y 5. La SINR del usuario 3 cae 4.3 dB respecto a los usuarios 1 y 5 y 1.2 dB respecto a los usuarios 2 y 4.

El ángulo de dispersión de 20° ha provocado que las gráficas sean más irregulares debido a que si nos fijamos en la *Figura 38*, estamos acotando el campo de dispersión a un ángulo pequeño. La señal e interferencias que emiten los usuarios 1, 2, 4 y 5 se ven acotadas a esta zona, por lo que parte de la señal se va a perder. En este caso la interferencia del usuario 3 va a ser la predominante. Esto provoca la irregularidad de la función ya que se distorsiona la señal real emitida por las antenas hacia cada usuario.

La SINR para los usuarios 1 y 5 y para los usuarios 2 y 4 son muy parecidas debido a que se encuentran simétricos respecto al plano horizontal. Las diferencias que



hay se deben a que la matriz de canal para cada uno de los usuarios es diferente, siendo por tanto distinta la matriz de covarianza con la que se calcula la SINR.

Los diagramas de radiación justifican las formas de las gráficas de las SINR que obtenemos para 5 usuarios, ya que al aumentar el número de usuarios, la intensidad de campo se ha tenido que distribuir a un número mayor de usuarios. La situación de los usuarios también influye ya que en algunos de los puntos en los que se sitúan los usuarios llegaba muy poca intensidad de campo, en ocasiones nula, sobre todo para los usuarios centrales (2, 3 y 4). En el análisis de los diagramas de radiación se detalla toda la información.

La disminución de los valores de la SINR respecto a los que obteníamos para la configuración de 3 usuarios en ausencia de ruido y con ASD de 20° (Figura 40) se debe también a los diagramas de radiación, ya que la señal se ha tenido que distribuir a un mayor número de direcciones, además de aumentar el número de señales interferentes en el sistema.

Analizamos la SINR para cada uno de los usuarios:

- **Usuario 1 ($\theta=60^\circ$):** La gráfica tiene tendencia creciente hasta la configuración de 4 antenas donde comienza a estancarse manteniéndose casi constante, esto se debe a que los diagramas de radiación al aumentar el número de antenas se hacen más directivos y como el ASD ha disminuido perdemos señal de zonas del espacio que antes captábamos para el ASD de 360° . La SINR varía entre -3.7 dB y -4.9 dB, siendo su máximo y su mínimo respectivamente. El recorrido es de 1.2 dB, esta disminución se debe a la reducción del ASD. La máxima SINR se consigue para la configuración de 9 antenas, aunque las configuraciones de 5, 7 y 10 antenas tienen valores muy parecidos, casi iguales. El mínimo se da para la configuración de 2 antenas.
- **Usuario 2 ($\theta=30^\circ$):** La gráfica presenta una tendencia descendente hasta 4 antenas donde comienzan subidas y bajadas de la SINR. Esta irregularidad se debe a que estamos perdiendo información debido a la reducción del ASD, por lo que dependiendo de la intensidad de radiación de las antenas para cada configuración tendremos incrementos o decrementos de la SINR. La SINR varía entre -6.25 dB y -8.2 dB. El recorrido es de 1.95 dB. El máximo de -6.25 dB se produce para la configuración de 2 antenas. El mínimo de -8.2 dB se alcanza para la configuración de 7 antenas.
- **Usuario 3 ($\theta=0^\circ$):** La gráfica presenta una tendencia decreciente hasta la configuración de 8 antenas donde comienza a crecer. Este decrecimiento no es muy acusado, dando una apariencia de ser casi constante la gráfica. Esto se debe a que parte de las interferencias se pierden debido a la disminución del ángulo de dispersión. La SINR varía entre -8 dB y -8.8

dB, siendo su recorrido de 0.8 dB. El máximo lo situamos para la configuración de 2 antenas (-8 dB) y el mínimo en -8.8 dB para la configuración de 6 antenas.

- **Usuario 4 ($\theta=-30^\circ$):** Esta gráfica es muy similar a la del usuario 2, los motivos de la tendencia de la gráfica son los mismos. La SINR varía entre -6.25 dB y -8 dB. El recorrido es de 1.75 dB. El máximo de -6.25 dB se produce para la configuración de 2 antenas. El mínimo de -8 dB se alcanza para la configuración de 7 antenas.
- **Usuario 5 ($\theta=-60^\circ$):** La gráfica tiene tendencia creciente hasta la configuración de 4 antenas donde se mantiene constante para 5 y 6 antenas, crece puntualmente para 7 y 8 antenas y vuelve a un valor similar a las configuraciones de 5 y 6 antenas y para las de 9 y 10. La SINR varía entre -3.4 dB y -4.9 dB, siendo su máximo y su mínimo respectivamente. El recorrido es de 1.5 dB, por lo que varía bastante el valor de la SINR con las diferentes configuraciones. La máxima SINR se consigue para la configuración de 8 antenas, la de 7 también tiene un valor muy similar. El mínimo se da para la configuración de 2 antenas.

Tras analizar las gráficas de la SINR para los cinco usuarios independientemente vemos al igual que para ASD de 360° , que el recorrido de las gráficas para el usuario 1, 2, 4 y 5 es mucho mayor que para el usuario 3, aunque en esta ocasión no nos llegue toda la señal de todas las direcciones por haber reducido el ASD.

Para cinco usuarios es más difícil elegir la configuración más adecuada, ya que si beneficiamos a los usuarios 1 y 5 estamos perjudicando a los usuarios 2, 3 y 4, ya que la tendencia de las gráficas es distinta, para los primeros crece al aumentar el número de antenas y para los segundos decrece. Analizamos las configuraciones que creemos que son más equitativas con todos los usuarios:

- **Configuración de 5 antenas:** Es la que tiene un número menor de antenas, por lo que los costes del sistema son menores. Con esta configuración estamos beneficiando a los usuarios 1, 2, 4 y 5 ya que estamos cogiendo una configuración en la que su SINR tiene un valor intermedio, mientras que la del usuario 3 es de las menores. Los valores de la SINR para esta configuración son -3.75 dB para el usuario 1, -7.5 dB para el 2, -8.5 dB para el 3, -7.5 dB para el 4 y -3.8 dB para el 5.
- **Configuración de 9 antenas:** Esta configuración beneficia al usuario 3, ya que la SINR del resto de los usuarios es muy parecida a la de la configuración de 5 antenas. El coste de este sistema es mayor debido a que aumentamos en cuatro el número de antenas del sistema por estación base, pero hemos conseguido aumentar la SINR del usuario 3 en 0.3 dB, por tanto habría que analizar si este aumento de la SINR compensa el incremento del coste. Los valores de la SINR para esta configuración son



de -3.7 dB para el usuario 1, -7.5 dB para el 2, -8.2 dB para el 3, -7.6 dB para el 4 y -3.75 dB para el 5.

Hemos conseguido unos valores muy parecidos con las configuraciones seleccionadas a las del sistema diseñado para ASD de 360°. También es cierto que si queremos aumentar la SINR del usuario 3 debemos realizar una inversión más alta que en el otro caso.

5.2.2.4. SINR para cinco usuarios en presencia de ruido

El escenario que vamos a analizar es aquel formado por M antenas transmisoras que varían entre 2 y 10, cinco usuarios que se sitúan respecto a las antenas a 60° , 30° , 0° , -30° y -60° . Este sistema se ve afectado por el ruido, además de por las interferencias que se producen entre los usuarios. La potencia del ruido presente en el sistema es de 1 W.

La diferencia entre las gráficas del apartado anterior y éste radica en que existe ruido en el sistema que hará que la señal no se reciba con tanta potencia como en el caso ideal en el que no hay ruido en el sistema. En este caso también analizaremos los casos en los que el ASD sea 360° y 20° .

5.2.2.4.1. ASD= 360°

La figura que a continuación se presenta representa la SINR en función del número de antenas transmisoras para cada uno de los cinco usuarios que tenemos en el sistema en presencia de ruido (potencia de ruido de 1 W). El ángulo de dispersión es de 360° .

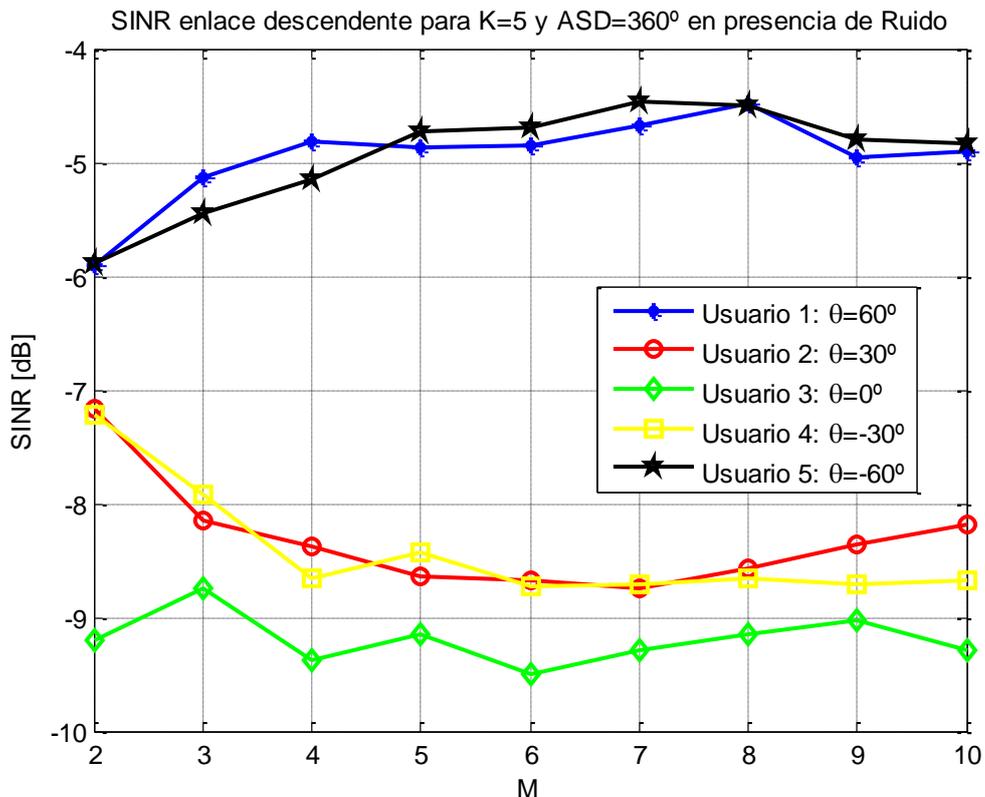


Figura 45: SINR para cinco usuarios con ASD de 360° en presencia de ruido

Los usuarios 1 y 5, al estar situados en las esquinas, se ven menos influenciados por las interferencias, ya que ambos reciben la mayor interferencia del usuario 2 y 4 respectivamente y en menor medida del resto de los usuarios. Los usuarios 2 y 4 se ven



influenciados en la misma medida por los usuarios 1 y 3 y 3 y 5 respectivamente, por lo que al tener una interferencia mayor, la SINR disminuirá respecto a los usuarios 1 y 5. El usuario 3 se ve influenciado por los otros cuatro usuarios, sobre todo le afectará la interferencia de los usuarios 2 y 4, siendo menor su SINR que la del resto. La SINR de los usuarios 2 y 4 cae una media de 2.8 dB respecto a los usuarios 1 y 5. La SINR del usuario 3 cae 3.9 dB respecto a los usuarios 1 y 5 y 1.1 dB respecto a los usuarios 2 y 4.

El ruido ha disminuido la SINR de todos los usuarios, pero esta disminución ha variado de unos usuarios a otros. La mayor o menor disminución depende de la influencia que tuvieron las interferencias en la SINR. Como hemos comentado anteriormente, los usuarios 1 y 5 son los que menos interferencias reciben, por lo que el ruido del sistema les ha afectado más disminuyendo su SINR en mayor proporción que a los usuarios 2, 3 y 4, que tenían una interferencia mayor. La SINR de los usuarios 1 y 5 ha disminuido en 1.1 dB aproximadamente respecto a la del sistema en ausencia de ruido (*Figura 43*), la de los usuarios 2 y 4 ha disminuido en unos 0.9 dB aproximadamente y la del usuario 3 en unos 0.8 dB.

Comparando con la gráfica de la SINR para el sistema en presencia de ruido para tres usuarios (*Figura 41*), el ruido ha afectado en menor medida, por lo queda patente el dominio de la interferencia frente al ruido. De nuevo vemos, que al tener un mayor número de usuarios las interferencias entre usuarios aumentan influyendo menos el ruido.

La SINR para los usuarios 1 y 5 y para los usuarios 2 y 4 son muy parecidas debido a que se encuentran simétricos respecto al plano horizontal. Las diferencias que hay se deben a que la matriz de canal para cada uno de los usuarios es diferente, siendo por tanto distinta la matriz de covarianza con la que se calcula la SINR.

Los diagramas de radiación justifican las formas de las gráficas de las SINR que obtenemos para 5 usuarios, ya que al aumentar el número de usuarios, la intensidad de campo se ha tenido que distribuir a más usuarios y por ende en más direcciones. La situación de los usuarios ha influido también porque en algunos de los puntos en los que se sitúan los usuarios llegaba muy poca intensidad de campo, en ocasiones nula, sobre todo para los usuarios centrales (2, 3 y 4). En el análisis de los diagramas de radiación que hemos hecho anteriormente se detalla toda la información.

Analizamos la SINR para cada uno de los usuarios:

- **Usuario 1 ($\theta=60^\circ$):** La gráfica tiene tendencia creciente hasta la configuración de 8 antenas donde comienza a descender, manteniéndose constante para 9 y 10 antenas. La SINR varía entre -4.5 dB y -5.9 dB, siendo su máximo y su mínimo respectivamente. El recorrido es de 1.4 dB, por lo que varía bastante el valor de la SINR con las diferentes configuraciones. La máxima SINR se consigue para la configuración de 8 antenas. El mínimo se da para la configuración de 2 antenas.



- **Usuario 2 ($\theta=30^\circ$):** La gráfica presenta una tendencia descendente hasta 7 antenas donde comienza a ascender. Esta tendencia descendente se debe a que el aumento del número de antenas hace que los diagramas de radiación sean más directivos, disminuyendo la señal que percibe este usuario, porque en la mayoría de las configuraciones en esta dirección se sitúan lóbulos muy pequeños o coinciden con el nacimiento de algún lóbulo no percibiendo casi señal en esta dirección. La SINR varía entre -7.2 dB y -8.75 dB. El recorrido es de 1.55 dB. El máximo de -7.2 dB se produce para la configuración de 2 antenas. El mínimo de -8.75 dB se alcanza para la configuración de 7 antenas, estando la configuración de 6 antenas también muy cercana del mínimo, en torno a los -8.65 dB.
- **Usuario 3 ($\theta=0^\circ$):** La gráfica alterna máximos y mínimos relativos entre las configuraciones de 2 y 6 antenas. A partir de 6 antenas comienza a crecer hasta que desciende para 10 antenas. La SINR varía entre -8.7 dB y -9.5 dB, siendo su recorrido de 0.8 dB. El menor recorrido en este usuario se debe a que los diagramas de radiación se mantenían más o menos en la misma línea en esta dirección al aumentar el número de antenas, por lo que la poca variabilidad de la gráfica se debe a ello. El máximo lo situamos para la configuración de 3 antenas en -8.7 dB y el mínimo en -9.5 dB para la configuración de 6 antenas.
- **Usuario 4 ($\theta=-30^\circ$):** La gráfica presenta una tendencia descendente, aunque aumenta puntualmente para la configuración de 5 antenas. Esta tendencia descendente lo podemos justificar gracias a los diagramas de radiación como lo hemos hecho para el usuario 2. La SINR varía entre -7.25 dB y -8.75 dB. El recorrido es de 1.5 dB. El máximo de -7.25 dB se produce para la configuración de 2 antenas. El mínimo de -8.75 dB se alcanza para las configuraciones de 6 y 7 antenas.
- **Usuario 5 ($\theta=-60^\circ$):** La gráfica tiene tendencia creciente hasta la configuración de 7 antenas donde comienza a descender. La SINR varía entre -4.4 dB y -5.9 dB, siendo su máximo y su mínimo respectivamente. El recorrido es de 1.5 dB, por lo que varía bastante el valor de la SINR con las diferentes configuraciones. La máxima SINR se consigue para la configuración de 7 antenas. El mínimo se da para la configuración de 2 antenas.

Tras analizar las gráficas de la SINR para los cinco usuarios independientemente podemos ver que el recorrido de las gráficas para el usuario 1, 2, 4 y 5 es mucho mayor que para el usuario 3, esto se debe a que los diagramas de radiación no apuntan con intensidades de campo muy distintas para cada configuración variando mucho el valor de la SINR.



Para cinco usuarios es más difícil elegir la configuración más adecuada, ya que si beneficiamos a los usuarios 1 y 5 estamos perjudicando a los usuarios 2, 3 y 4, ya que la tendencia de las gráficas es distinta, para los primeros crece al aumentar el número de antenas y para los segundos decrece. Analizamos las configuraciones que creemos que son más equitativas con todos los usuarios:

- **Configuración de 3 antenas:** Es la que tiene un número menor de antenas, por lo que el coste del sistema será menor. Con esta configuración estamos beneficiando a los usuarios 2, 3 y 4 ya que estamos cogiendo una configuración en la que su SINR es de las más altas en detrimento del 1 y el 5. Hay que ver también que la SINR es menor de todas formas para los usuarios 2, 3 y 4, ya que los valores más altos que se alcanzan son siempre menores que para el 1 y el 5, por las causas analizadas anteriormente. Los valores de la SINR para esta configuración son -5.1 dB para el usuario 1, -8.1 dB para el 2, -8.75 dB para el 3, -7.9 dB para el 4 y -5.4 dB para el 5.
- **Configuración de 5 antenas:** Esta configuración beneficia más a la SINR de los usuarios 1 y 5, escogiendo valores cercanos al máximo en detrimento del resto de los usuarios. Aún así, se ha intentado escoger una configuración en la que los usuarios 2, 3 y 4 no se sitúen en mínimos sino en unos valores intermedios. El coste de este sistema es mayor debido a que aumentamos en dos el número de antenas del sistema por BTS. Los valores de la SINR para esta configuración son de -4.9 dB para el usuario 1, -8.3 dB para el 2, -9.3 dB para el 3, -8.6 dB para el 4 y -5.1 dB para el 5.

La configuración más equitativa sería la de 3 antenas, ya que aunque disminuamos la SINR para los usuarios 1 y 5 estamos consiguiendo una SINR más alta para los usuarios 2, 3 y 4. Además este sistema nos saldría más económico ya que nos ahorraríamos el gasto de dos antenas más por estación base. El ruido nos ha empeorado la SINR, pero este empeoramiento no ha sido muy significativo. Aún así, las configuraciones elegidas coinciden con las del sistema en ausencia de ruido, ya que la forma de las gráficas se mantiene, lo único que provoca el ruido es la disminución de los valores de la SINR.

5.2.2.4.2. $ASD=20^\circ$

La figura que a continuación se presenta representa la SINR en función del número de antenas transmisoras para cada uno de los cinco usuarios que tenemos en el sistema en presencia de ruido (la potencia de ruido es de 1 W). El ángulo de dispersión es de 20° . El ruido ha sido de una unidad.

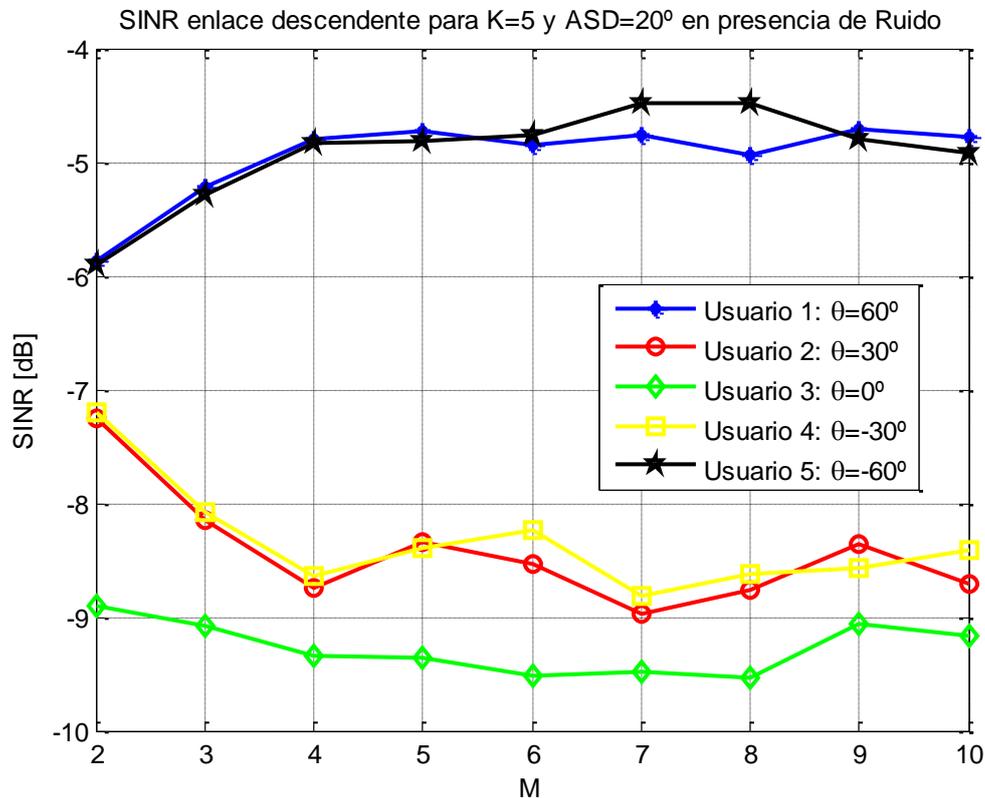


Figura 46: SINR para cinco usuarios con ASD de 20° en presencia de ruido

Los usuarios 1 y 5, al estar situados en las esquinas, se ven menos influenciados por las interferencias, ya que ambos reciben la mayor interferencia del usuario 2 y 4 respectivamente y en menor medida del resto de los usuarios. Los usuarios 2 y 4 se ven influenciados en la misma medida por los usuarios 1 y 3 y 3 y 5 respectivamente, por lo que al tener una interferencia mayor, la SINR disminuirá respecto a los usuarios 1 y 5. El usuario 3 se ve influenciado por los otros cuatro usuarios, sobre todo le afectará la interferencia de los usuarios 2 y 4, siendo menor su SINR que la del resto. La SINR de los usuarios 2 y 4 cae una media de 2.5 dB respecto a los usuarios 1 y 5. La SINR del usuario 3 cae 3.8 dB respecto a los usuarios 1 y 5 y 1.3 dB respecto a los usuarios 2 y 4.

El ángulo de dispersión de 20° ha provocado que las gráficas sean más irregulares debido a que si nos fijamos en la *Figura 38*, estamos acotando el campo de dispersión a un ángulo pequeño. La señal e interferencias que emiten los usuarios 1, 2, 4 y 5 se ven acotadas a esta zona, por lo que parte de la señal se va a perder. En este caso la interferencia del usuario 3 va a ser la predominante. Esto provoca la irregularidad de la función ya que se distorsiona la señal real emitida por las antenas hacia cada usuario.

El ruido ha disminuido la SINR de todos los usuarios, pero esta disminución ha variado de unos usuarios a otros. La mayor o menor disminución depende de la influencia que tuvieron las interferencias en la SINR. Como hemos comentado anteriormente, los usuarios 1 y 5 son los que menos interferencias reciben, por lo que el ruido del sistema les ha afectado más disminuyendo su SINR en mayor proporción que a los usuarios 2, 3 y 4, que tenían una interferencia mayor. La SINR de los usuarios 1 y 5 ha disminuido en 1 dB aproximadamente respecto a la del sistema en ausencia de ruido (*Figura 44*), la de los usuarios 2 y 4 ha disminuido en unos 0.95 dB aproximadamente y la del usuario 3 en unos 0.9 dB. Esta disminución es menor, ya que perdemos algo de la señal y la interferencia debido a la reducción del ASD.

Comparando con la gráfica de la SINR para el sistema en presencia de ruido para tres usuarios (*Figura 42*), el ruido ha afectado en menor medida. De nuevo vemos, que al tener un mayor número de usuarios las interferencias entre usuarios aumentan influyendo menos el ruido.

La SINR para los usuarios 1 y 5 y para los usuarios 2 y 4 son muy parecidas debido a que se encuentran simétricos respecto al plano horizontal. Las diferencias que hay se deben a que la matriz de canal para cada uno de los usuarios es diferente, siendo por tanto distinta la matriz de covarianza con la que se calcula la SINR.

Los diagramas de radiación justifican las formas de las gráficas de las SINR que obtenemos para 5 usuarios, ya que al aumentar el número de usuarios, la intensidad de campo se ha tenido que distribuir a un número mayor de usuarios. La situación de los usuarios ha influido también porque en algunos de los puntos en los que se sitúan los usuarios llegaba muy poca intensidad de campo, en ocasiones nula, sobre todo para los usuarios centrales (2, 3 y 4). En el análisis de los diagramas de radiación se detalla toda la información.

La disminución de los valores de la SINR respecto a los que obteníamos para la configuración de 5 usuarios en ausencia de ruido y con ASD de 20° (*Figura 44*) se debe también a los diagramas de radiación, ya que la señal se ha tenido que distribuir a un mayor número de direcciones, además de aumentar el número de señales interferentes en el sistema.

Analizamos la SINR para cada uno de los usuarios:

- **Usuario 1 ($\theta=60^\circ$):** La gráfica tiene tendencia creciente hasta la configuración de 4 antenas donde comienza a estancarse manteniéndose casi constante. Esto se debe a que los diagramas de radiación, al aumentar el número de antenas se hacen más directivos y como el ASD ha disminuido perdemos señal de zonas del espacio que antes captábamos para el ASD de 360° . La SINR varía entre -4.7 dB y -5.9 dB, siendo su máximo y su mínimo respectivamente. El recorrido es de 1.2 dB, esta disminución se debe a la reducción del ASD. La máxima SINR se consigue para la configuración de 9 antenas, aunque las



configuraciones de 5, 7 y 10 antenas tienen valores muy parecidos, casi iguales. El mínimo se da para la configuración de 2 antenas.

- **Usuario 2 ($\theta=30^\circ$):** La gráfica presenta una tendencia descendente hasta 4 antenas donde comienzan subidas y bajadas de la SINR. Esta irregularidad se debe a que estamos perdiendo información debido a la reducción del ASD, por lo que dependiendo de la intensidad de radiación de las antenas para cada configuración tendremos incrementos o decrementos de la SINR. La SINR varía entre -7.25 dB y -8.9 dB. El recorrido es de 1.65 dB. El máximo de -7.25 dB se produce para la configuración de 2 antenas. El mínimo de -8.9 dB se alcanza para la configuración de 7 antenas.
- **Usuario 3 ($\theta=0^\circ$):** La gráfica presenta una tendencia decreciente hasta la configuración de 8 antenas donde comienza a crecer. Este decrecimiento no es muy acusado, dando una apariencia de ser casi constante la gráfica. Esto se debe a que parte de las interferencias se pierden debido a la disminución del ángulo de dispersión. La SINR varía entre -8.9 dB y -9.5 dB, siendo su recorrido de 0.6 dB. El máximo lo situamos para la configuración de 2 antenas en -8.9 dB y el mínimo en -9.5 dB para la configuración de 8 antenas.
- **Usuario 4 ($\theta=-30^\circ$):** Esta gráfica es muy similar a la del usuario 2, los motivos de la tendencia de la gráfica son los mismos. La SINR varía entre -7.2 dB y -8.8 dB. El recorrido es de 1.6 dB. El máximo de -7.2 dB se produce para la configuración de 2 antenas. El mínimo de -8.8 dB se alcanza para la configuración de 7 antenas.
- **Usuario 5 ($\theta=-60^\circ$):** La gráfica tiene tendencia creciente hasta la configuración de 4 antenas donde se mantiene constante para 4, 5 y 6 antenas, crece puntualmente para 7 y 8 antenas y vuelve a un valor similar a las configuraciones de 4, 5 y 6 antenas para las de 9 y 10. La SINR varía entre -4.4 dB y -5.9 dB, siendo su máximo y su mínimo respectivamente. El recorrido es de 1.5 dB, por lo que varía bastante el valor de la SINR con las diferentes configuraciones. La máxima SINR se consigue para la configuración de 8 antenas, la de 7 también tiene un valor muy similar. El mínimo se da para la configuración de 2 antenas.

Tras analizar las gráficas de la SINR para los cinco usuarios independientemente vemos al igual que para ASD de 360° , que el recorrido de las gráficas para el usuario 1, 2, 4 y 5 es mucho mayor que para el usuario 3, aunque en esta ocasión no nos llegue toda la señal de todas las direcciones por haber reducido el ASD.

Para cinco usuarios es más difícil elegir una configuración óptima, ya que si beneficiamos a los usuarios 1 y 5 estamos perjudicando a los usuarios 2, 3 y 4, ya que la



tendencia de las gráficas es distinta, para los primeros crece al aumentar el número de antenas y para los segundos decrece. Analizamos las configuraciones que creemos que son más equitativas con todos los usuarios:

- **Configuración de 5 antenas:** Es la que tiene un número menor de antenas, por lo que los costes del sistema son menores que la de un número mayor de antenas. Con esta configuración estamos beneficiando a los usuarios 1, 2, 4 y 5 ya que estamos cogiendo una configuración en la que su SINR tiene un valor intermedio, mientras que la del usuario 3 es de las menores. Los valores de la SINR para esta configuración son -4.75 dB para el usuario 1, -8.3 dB para el 2, -9.3 dB para el 3, -8.3 dB para el 4 y -4.8 dB para el 5.
- **Configuración de 9 antenas:** Esta configuración beneficia al usuario 3, ya que la SINR del resto de los usuarios es muy parecida a la de la configuración de 5 antenas. El coste de este sistema es mayor debido a que aumentamos en cuatro el número de antenas del sistema por estación base, pero hemos conseguido aumentar la SINR del usuario 3 en 0.2 dB, por tanto habría que analizar si este aumento de la SINR compensa el incremento del coste. Los valores de la SINR para esta configuración son de -4.7 dB para el usuario 1, -8.3 dB para el 2, -9.1 dB para el 3, -8.5 dB para el 4 y -4.75 dB para el 5.

Hemos conseguido unos valores muy parecidos con las configuraciones seleccionadas a las del sistema diseñado para ASD de 360°. También es cierto que si queremos aumentar la SINR del usuario 3 debemos realizar una inversión más alta que en el otro caso. El ruido nos ha reducido la SINR pero no de forma significativa. Las formas de las gráficas se han mantenido, así como las configuraciones seleccionadas como más adecuadas para el mismo sistema en ausencia de ruido.

5.2.3. Información Mutua

Es la segunda medida que analizaremos para ver las prestaciones del sistema que estamos estudiando.

Estudiaremos varios casos, éstos van a ser:

1. Información mutua para tres usuarios en ausencia de ruido con ASD de 360°.
2. Información mutua para tres usuarios en ausencia de ruido con ASD de 20°.
3. Información mutua para tres usuarios en presencia de ruido con ASD de 360°.
4. Información mutua para tres usuarios en presencia de ruido con ASD de 20°.
5. Información mutua para cinco usuarios en ausencia de ruido con ASD de 360°.
6. Información mutua para cinco usuarios en ausencia de ruido con ASD de 20°.
7. Información mutua para cinco usuarios en presencia de ruido con ASD de 360°.
8. Información mutua para cinco usuarios en presencia de ruido con ASD de 20°.

Para ponernos en antecedentes de cómo calculamos la información mutua recordamos la fórmula genérica, que es la que hemos utilizado a la hora de calcular prácticamente la información mutua.

$$IM = \log_2 \left(\frac{P_S + P_I + P_N}{P_I + P_N} \right)$$

Ecuación 41: Expresión genérica de la Información Mutua utilizada prácticamente

En el apartado 4 en el que realizábamos el modelado del sistema apuntábamos que al calcular la covarianza de la señal, la media de los términos cruzados sería nula. Al realizar las simulaciones hemos comprobado que esto no es cierto, ya que los términos cruzados tienen una importancia significativa a la hora de realizar un cálculo riguroso de la información mutua. Por tanto, la expresión simplificada de la covarianza que se expresaba en la *Ecuación 39* no se ha utilizado, y hemos calculado la información mutua utilizando la expresión completa de la covarianza expresada en la *Ecuación 38*.

5.2.3.1. Información mutua para tres usuarios en ausencia de ruido

El escenario que vamos a analizar es aquel formado por M antenas transmisoras que varían entre 2 y 10, tres usuarios que se sitúan respecto a las antenas a 45° , 0° y -45° . El sistema no se ve afectado por el ruido, sólo por las interferencias que se producen entre los usuarios, por tanto estamos hablando de una situación ideal.

5.2.3.1.1. $ASD=360^\circ$

La figura que a continuación se presenta representa la información mutua en función del número de antenas transmisoras para cada uno de los tres usuarios que tenemos en el sistema. El ángulo de dispersión es de 360° .

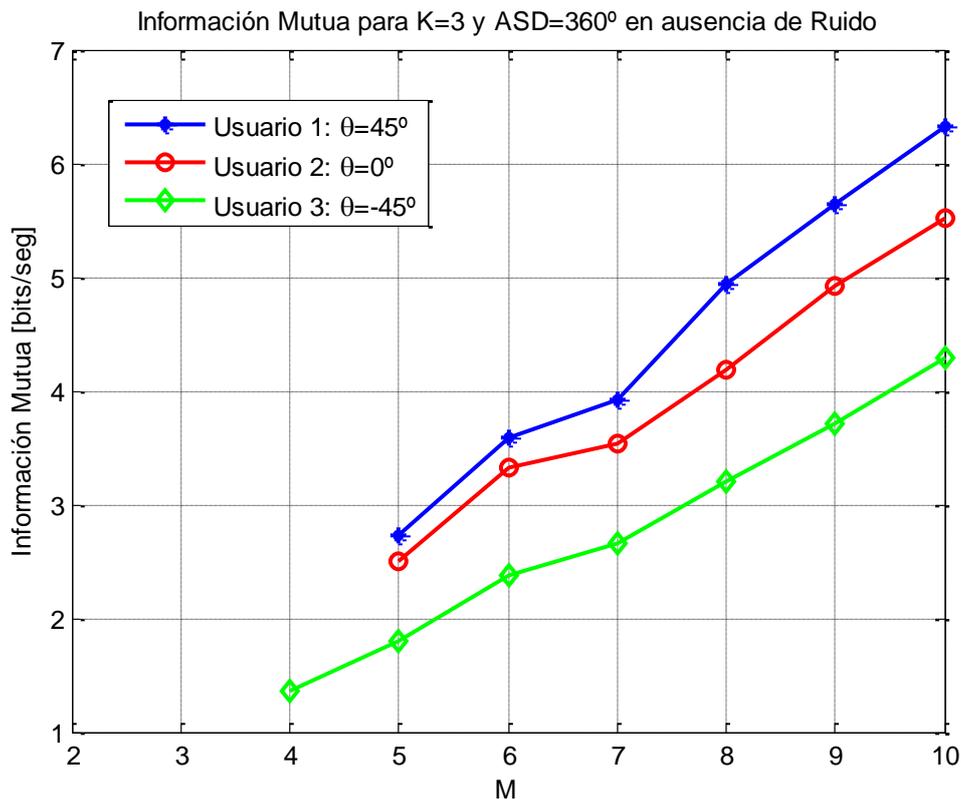


Figura 47: Información mutua para tres usuarios con ASD de 360° en ausencia de ruido

La tendencia de la gráfica es ascendente a medida que aumenta el número de antenas, esto tiene coherencia debido a que al aumentar el número de antenas la información que se envía aumenta.

Atendiendo a los resultados que obteníamos de la SINR, véase *Figura 39*, los resultados óptimos habrían sido que la información mutua de los usuarios 1 y 3 fuera muy similar y mayor que para el usuario 2, pero analizando la gráfica obtenida, la información mutua del usuario 3 es menor que la de los usuarios 1 y 2, aunque se cumple que la del usuario 1 es mayor que la del 3.

Tras analizar rigurosamente el proceso de cálculo de la información mutua asegurándonos de que eran correctos, no hemos obtenido los resultados esperados.

5.2.3.1.2. $ASD=20^\circ$

La gráfica que a continuación se presenta representa la información mutua en función del número de antenas transmisoras para cada uno de los tres usuarios que tenemos en el sistema. El ángulo de dispersión es de 20° .

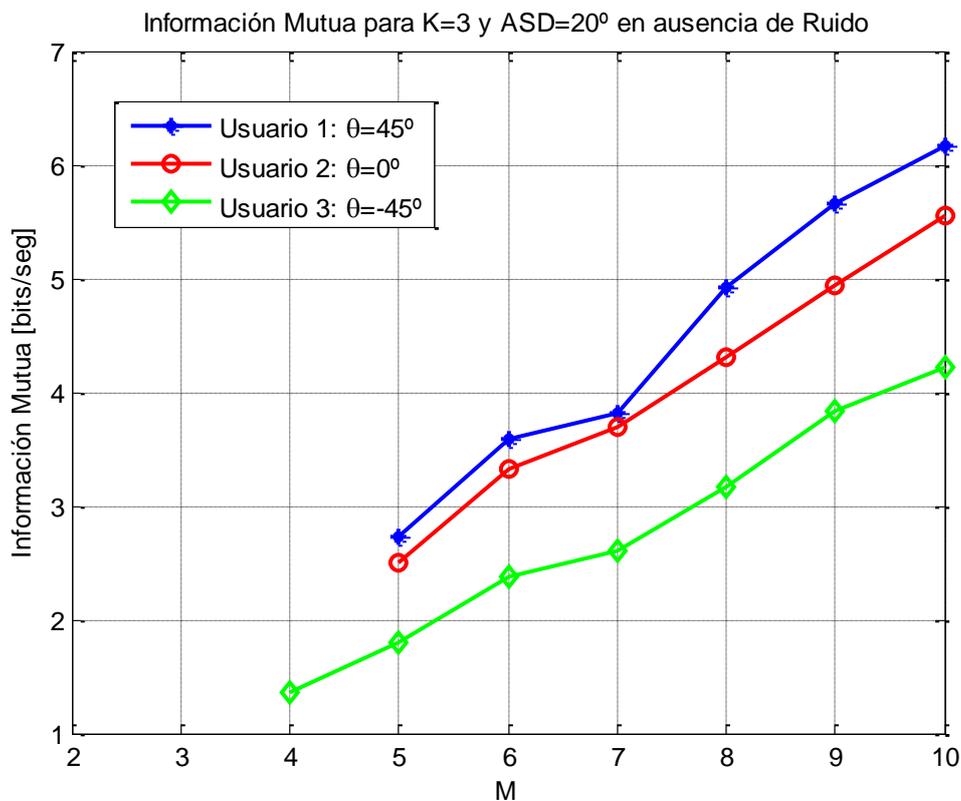


Figura 48: Información mutua para tres usuarios con ASD de 20° en ausencia de ruido

Los resultados obtenidos para ASD de 20° son muy similares a los obtenidos para ASD de 360° . La tónica de la gráfica sigue siendo la misma y si comparamos con los resultados obtenidos de la SINR para esta misma configuración, véase *Figura 40*, los resultados no son los esperados al igual que para 360° . La única diferencia que podemos observar es que para ciertas configuraciones, por ejemplo para 7 antenas, los valores de la información mutua de los usuarios 1 y 2 están más próximos.

5.2.3.2. Información mutua para tres usuarios en presencia de ruido

El escenario que vamos a analizar es aquel formado por M antenas transmisoras que varían entre 2 y 10, tres usuarios que se sitúan respecto a las antenas a 45° , 0° y -45° . Este sistema se ve afectado por el ruido, además de por las interferencias que se producen entre los usuarios. La potencia del ruido presente en el sistema es de 1 W.

La diferencia entre las gráficas del apartado anterior y este radica en que existe ruido en el sistema que hará que la señal no se reciba con tanta potencia como en el caso ideal en el que no hay ruido en el sistema. En este caso también analizaremos los casos en los que el ASD sea 360° y 20° .

5.2.3.2.1. $ASD=360^\circ$

La gráfica que a continuación se presenta representa la información mutua en función del número de antenas transmisoras para cada uno de los tres usuarios que tenemos en el sistema en presencia de ruido (la potencia de ruido es de 1 W). El ángulo de dispersión es de 360° .

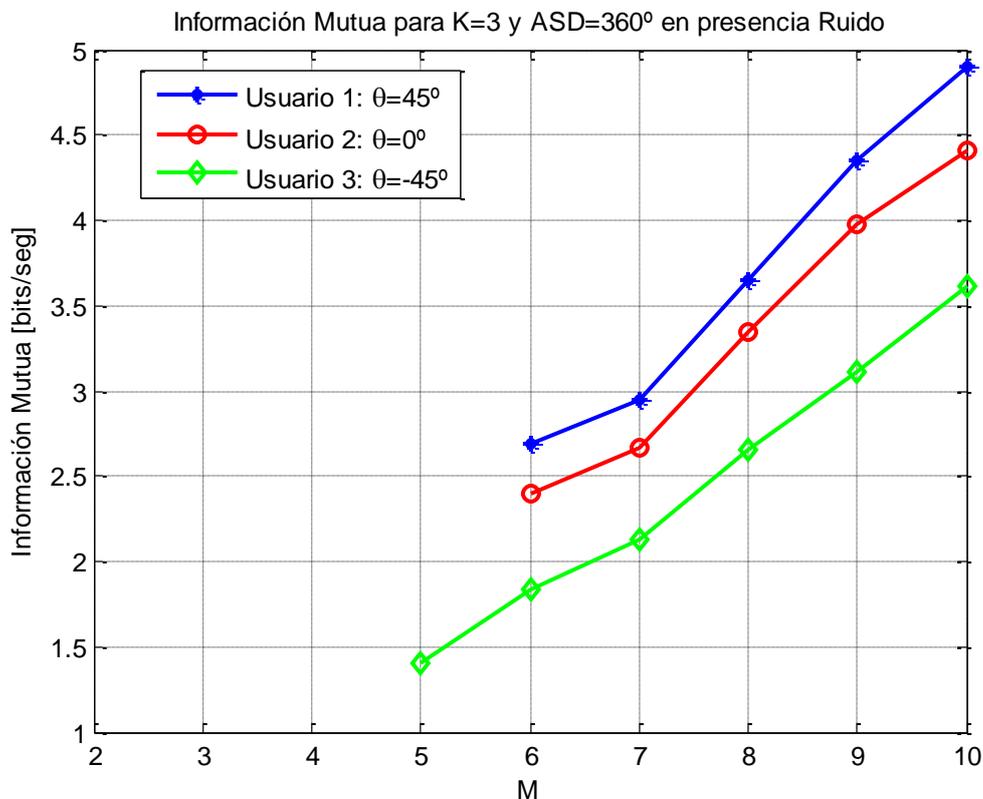


Figura 49: Información mutua para tres usuarios con ASD de 360° en presencia de ruido

Los resultados obtenidos son muy similares a los obtenidos para ASD de 360° en ausencia de ruido, pero en este caso difieren los valores obtenidos, ya que al haber ruido en el sistema, la información mutua disminuye, siendo esta disminución mayor al aumentar el número de antenas (aproximadamente 1.2 bits/seg para 10 antenas).

La tónica de la gráfica sigue siendo la misma y si comparamos con los resultados obtenidos de la SINR para esta misma configuración, véase *Figura 41*, los resultados no son los esperados al igual que en las gráficas en ausencia de ruido.

5.2.3.2.2. $ASD=20^\circ$

La gráfica que a continuación se presenta representa la información mutua en función del número de antenas transmisoras para cada uno de los tres usuarios que tenemos en el sistema en presencia de ruido (la potencia de ruido es de 1 W). El ángulo de dispersión es de 20° .

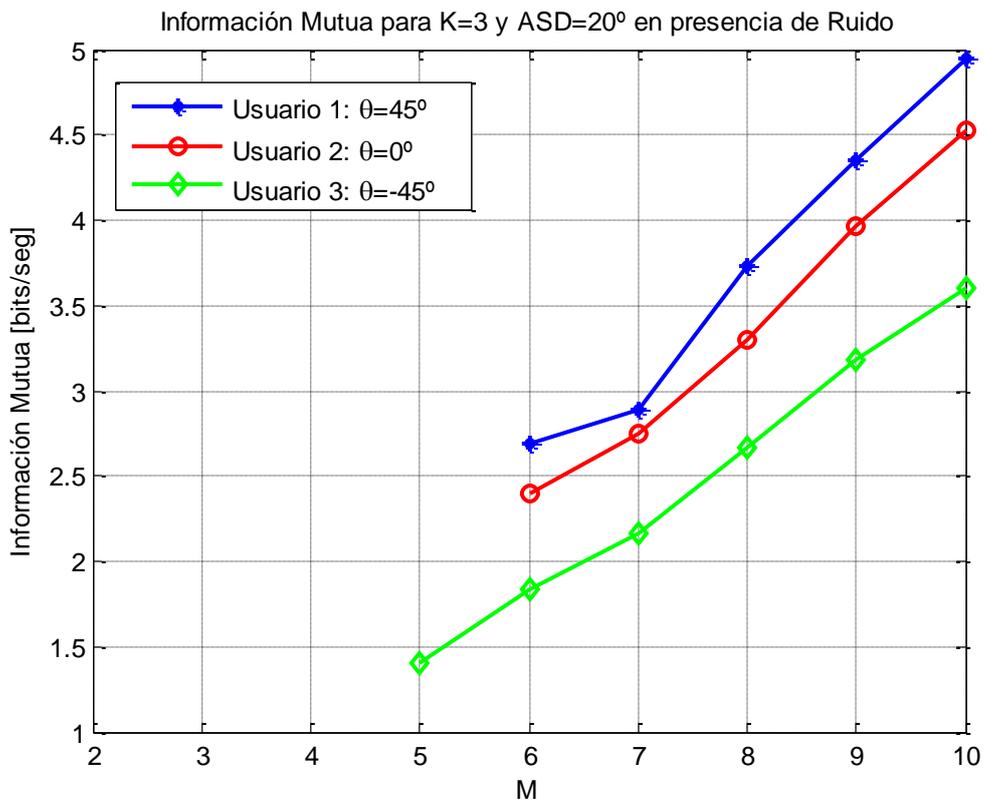


Figura 50: Información mutua para tres usuarios con ASD de 20° en presencia de ruido

Los resultados obtenidos para ASD de 20° son muy similares a los obtenidos para ASD de 360° . La tónica de la gráfica sigue siendo la misma y si comparamos con los resultados obtenidos de la SINR para esta misma configuración, véase *Figura 42*, los resultados no son los esperados al igual que para 360° . La única diferencia que podemos observar es que para ciertas configuraciones, por ejemplo para 7 antenas, los valores de la información mutua de los usuarios 1 y 2 están más próximos.

5.2.3.3. Información mutua para cinco usuarios en ausencia de ruido

El escenario que vamos a analizar es aquel formado por M antenas transmisoras que varían entre 2 y 10, cinco usuarios que se sitúan respecto a las antenas a 60° , 30° , 0° , -30° y -60° . El sistema no se ve afectado por el ruido, sólo por las interferencias que se producen entre los usuarios, por tanto estamos hablando de una situación ideal.

5.2.3.3.1. $ASD=360^\circ$

La gráfica que a continuación se presenta representa la información mutua en función del número de antenas transmisoras para cada uno de los cinco usuarios que tenemos en el sistema. El ángulo de dispersión es de 360° .

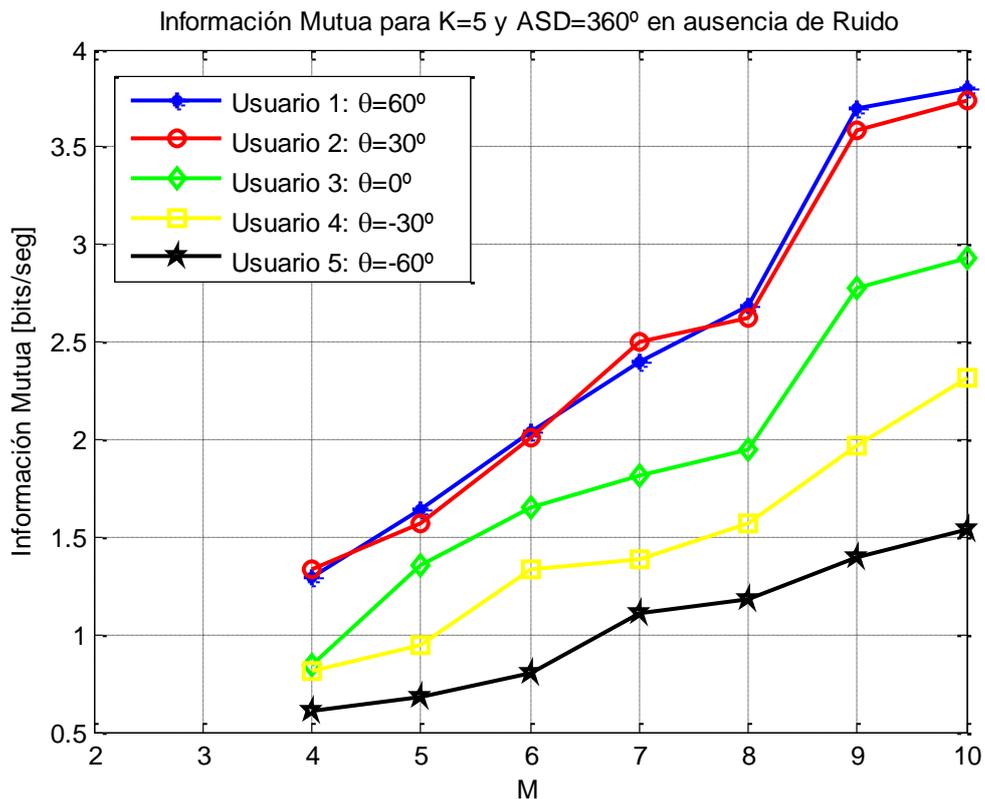


Figura 51: Información mutua para cinco usuarios con ASD de 360° en ausencia de ruido

La tendencia de la gráfica es ascendente con el incremento del número de antenas al igual que para las configuraciones de tres usuarios, pero tampoco hemos conseguido los resultados esperados para cinco usuarios.

Tras analizar la gráfica de la SINR para cinco usuarios con ASD de 360° en ausencia de ruido, véase *Figura 43*, los resultados esperados eran que los usuarios 1 y 5 tuvieran una información mutua muy parecida y más alta que el resto de los usuarios, que igualmente la información mutua de los usuarios 2 y 4 fuera muy similar y que esta fuera menor que para los usuarios 1 y 5 y mayor que para el usuario 3 y que el usuario 3 presentara la menor información mutua. Analizando la *Figura 51*, vemos que el

resultado se aleja del esperado, ya que la información mutua no se ve influenciada por la situación de los usuarios en el sistema ni por la menor o mayor influencia de las interferencias entre usuarios.

5.2.3.3.2. $ASD=20^\circ$

La gráfica que a continuación se presenta representa la información mutua en función del número de antenas transmisoras para cada uno de los cinco usuarios que tenemos en el sistema. El ángulo de dispersión es de 20° .

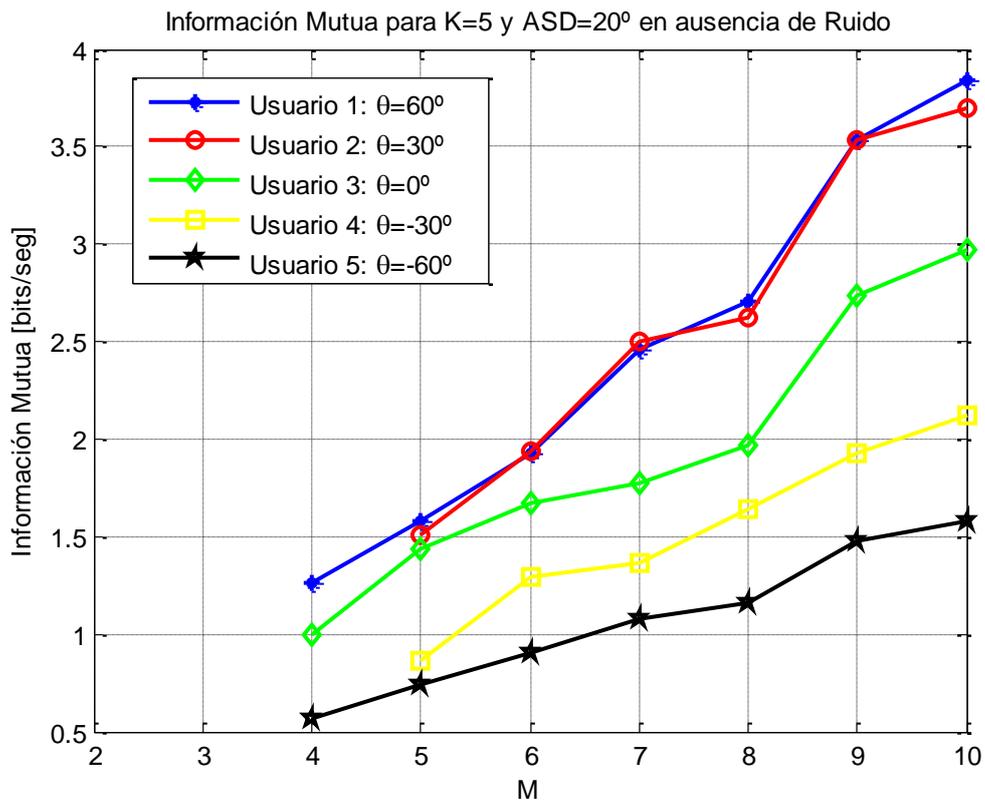


Figura 52: Información mutua para cinco usuarios con ASD de 20° en ausencia de ruido

Los resultados no han sido los esperados al igual que para el sistema con ASD de 360° , el comportamiento es el mismo que el analizado para la *Figura 51*, pero en este caso las gráficas para los diferentes usuarios se han juntado un poco sobre todo para los usuarios 1 y 2.

5.2.3.4. Información mutua para cinco usuarios en presencia de ruido

El escenario que vamos a analizar es aquel formado por M antenas transmisoras que varían entre 2 y 10, cinco usuarios que se sitúan respecto a las antenas a 60° , 30° , 0° , -30° y -60° . Este sistema se ve afectado por el ruido, además de por las interferencias que se producen entre los usuarios. La potencia del ruido presente en el sistema es de 1 W.

La diferencia entre las gráficas del apartado anterior y éste radica en que existe ruido en el sistema que hará que la señal no se reciba con tanta potencia como en el caso ideal en el que no hay ruido en el sistema. En este caso también analizaremos los casos en los que el ASD sea 360° y 20° .

5.2.3.4.1. ASD= 360°

La gráfica que a continuación se presenta representa la información mutua en función del número de antenas transmisoras para cada uno de los cinco usuarios que tenemos en el sistema en presencia de ruido (la potencia de ruido es de 1 W). El ángulo de dispersión es de 360° .

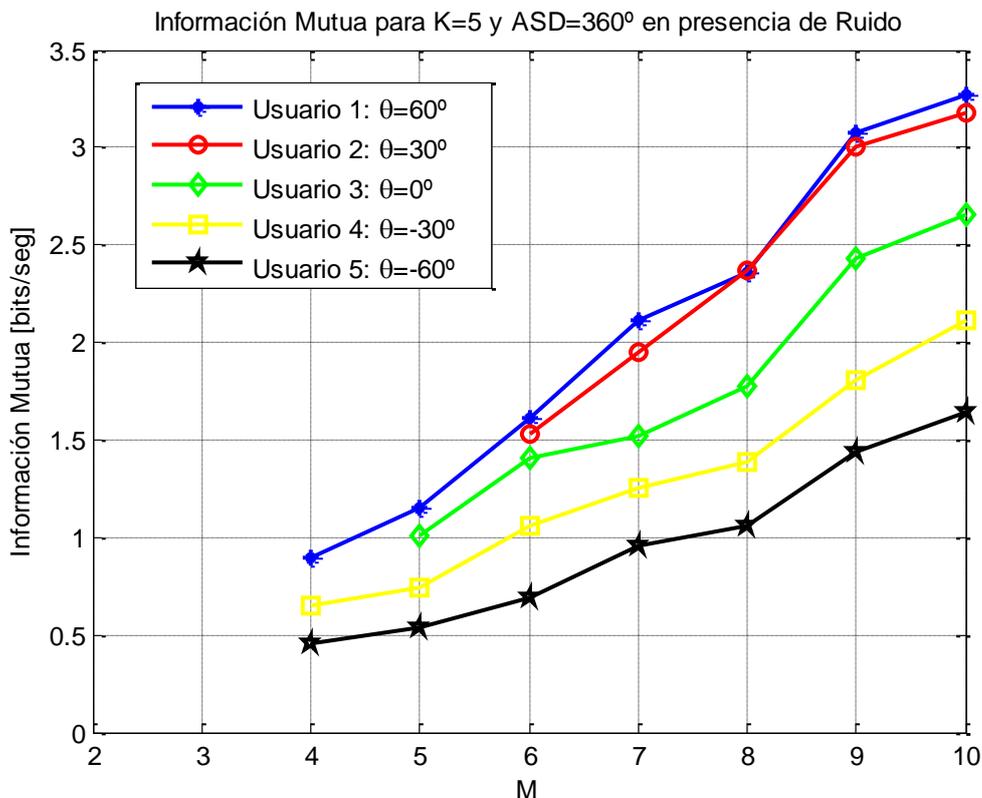


Figura 53: Información mutua para cinco usuarios con ASD de 360° en presencia de ruido

Los resultados obtenidos son muy similares a los obtenidos para ASD de 360° en ausencia de ruido, pero en este caso difieren los valores obtenidos, ya que al haber ruido en el sistema, la información mutua disminuye, siendo esta disminución mayor al

aumentar el número de antenas (aproximadamente 0.55 bits/seg para 10 antenas). Comparando esta disminución con la obtenida para tres usuarios, en este caso ha sido menor debido a que al haber más usuarios en el sistema el ruido afecta en menor medida que para el sistema de tres usuarios.

La tónica de la gráfica sigue siendo la misma y si comparamos con los resultados obtenidos de la SINR para esta misma configuración, véase *Figura 45*, los resultados no son los esperados al igual que en las gráficas en ausencia de ruido.

5.2.3.4.2. $ASD=20^\circ$

La gráfica que a continuación se presenta representa la información mutua en función del número de antenas transmisoras para cada uno de los tres usuarios que tenemos en el sistema en presencia de ruido (la potencia de ruido es de 1 W). El ángulo de dispersión es de 20° .

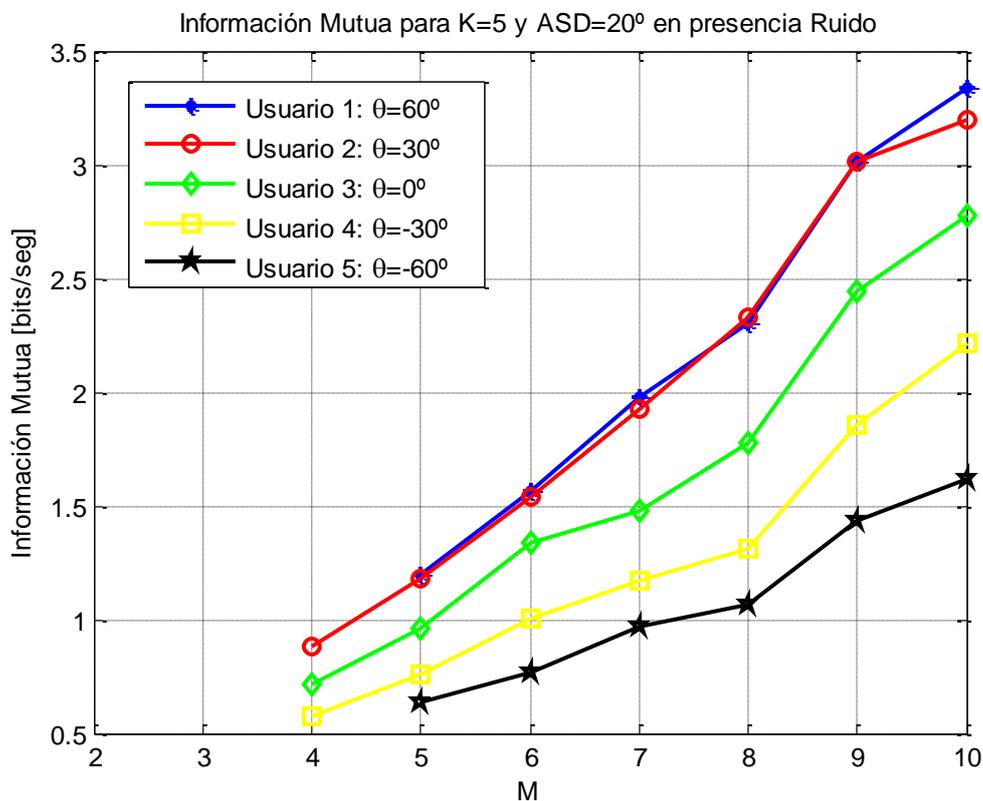


Figura 54: Información mutua para cinco usuarios con ASD de 20° en presencia de ruido

Los resultados obtenidos para ASD de 20° son muy similares a los obtenidos para ASD de 360° . La tónica de la gráfica sigue siendo la misma y si comparamos con los resultados obtenidos de la SINR para esta misma configuración, véase *Figura 46*, los resultados no son los esperados al igual que para 360° . La única diferencia que podemos observar es que sobre todos los valores de la información mutua para los usuarios 1 y 2 son muy parecidas.

6. Conclusiones

Los sistemas MIMO van a ser a muy corto plazo una de las alternativas más potentes para conseguir mejorar las prestaciones de las comunicaciones móviles que demandan cada vez más ancho de banda, mejor calidad de señal y una buena cobertura en cualquier lugar.

El nacimiento de la próxima generación de sistemas de comunicación que será la llamada 4G o LTE (*Long Term Evolution*) que puede definirse como la total convergencia de redes inalámbricas móviles y del acceso a las mismas, permitirá manejar las distintas aplicaciones multimedia que irán saliendo y demandando los usuarios en movilidad, [3] y [13]. Los sistemas MIMO serán importantes en el desarrollo de esta nueva generación, ya que con ellos podremos obtener mejores prestaciones. En las siguientes tablas se recogen extractos de las normas del 3GPP, en las que se pone en evidencia el uso de los sistemas MIMO en esta nueva generación que ya se está comenzando a desarrollar, [13].

Access Scheme	UL	DFTS-OFDM
	DL	OFDMA
Bandwidth	1.4, 3, 5, 10, 15, 20MHz	
Minimum TTI	1msec	
Sub-carrier spacing	15kHz	
Cyclic prefix length	Short	4.7μsec
	Long	16.7μsec
Modulation	QPSK, 16QAM, 64QAM	
Spatial multiplexing	Single layer for UL per UE Up to 4 layers for DL per UE MU-MIMO supported for UL and DL	

Tabla 20: LTE Release 8 - Principales parámetros

Category		1	2	3	4	5
Peak rate Mbps	DL	10	50	100	150	300
	UL	5	25	50	50	75
Capability for physical functionalities						
RF bandwidth	20MHz					
Modulation	DL	QPSK, 16QAM, 64QAM				
	UL	QPSK, 16QAM				QPSK, 16QAM, 64QAM
Multi-antenna						
2 Rx diversity	Assumed in performance requirements.					
2x2 MIMO	Not supported	Mandatory				
4x4 MIMO	Not supported					Mandatory

Tabla 21: LTE Release 8 – Categorías de los equipos de los usuarios



Por tanto, no cabe duda que los sistemas MIMO se están convirtiendo en el futuro de las comunicaciones móviles, es por ello, que el estudio de este tipo de sistemas es importante actualmente para poder analizar todas las posibles implementaciones de los sistemas MIMO.

El campo de nuestro estudio ha sido los sistemas MIMO multiusuarios en conformado de haz, por lo que hemos intentado explotar los beneficios que nos pueden aportar los arrays de antenas a la hora de mejorar las prestaciones de los sistemas de comunicaciones móviles.

Implementar este tipo de sistemas no ha sido tarea sencilla ya que conseguir las configuraciones de los arrays de antenas óptimos para obtener las mejores prestaciones posibles no ha sido trivial. A lo largo del estudio hemos tenido que ir realizando diversos cambios en el canal y descubriendo que las suposiciones que al principio creíamos no se cumplían tras analizar los resultados que íbamos obteniendo.

El sistema que hemos presentado en este estudio es el resultado de múltiples simulaciones que han ido evolucionando tras ir realizando cambios en todo el sistema, no sólo del canal como hemos apuntado antes, sino de las matrices de conformado de haz, de la forma de obtener las matrices de covarianza, etc. Por tanto, los resultados obtenidos hasta obtener los presentados en este proyecto han servido para poder depurar el sistema lo más posible.

Una de las suposiciones con las que comenzamos este proyecto fue pensar que el ángulo de dispersión de las antenas transmisoras (ASD) apuntaba a cada uno de los usuarios con la apertura angular que le dábamos, en nuestro estudio la ASD ha sido de 360° y de 20°), pero tras obtener los primeros resultados de la SINR vimos que realmente el comportamiento del ASD es el que especificábamos en la *Figura 38*, es decir, que esa apertura se daba centrada en 0° no centrada en el ángulo en el que se encontraba cada usuario. A esta conclusión llegamos debido a que los resultados de la SINR empeoraban al disminuir la ASD para todos los usuarios en mayor medida que para el usuario que se situaba en 0° .

El estudio de los diagramas de radiación fue necesario realizarlo para verificar que los resultados obtenidos de la SINR eran coherentes. Nuestro proyecto se basa en explotar los arrays de antenas, por lo que analizar como radian las antenas para cada una de las configuraciones ha sido de vital importancia.

El diseño espacial del sistema, es decir, las posiciones que han ocupado los usuarios no han sido las más idóneas. Tras obtener los diagramas de radiación para tres y cinco usuarios para cada una de las configuraciones de los arrays hemos podido ver que en los puntos en los que se situaban los usuarios para ciertas configuraciones las interferencias eran altas para unos usuarios y más pequeñas para otros, por lo que las prestaciones del sistema no han sido podido ser las mejores.

Para obtener mejores resultados se tendría que hacer un estudio pormenorizado de todo el espacio, para ver en qué puntos todos los usuarios tendrían unas



interferencias lo más pequeñas posibles y de forma más o menos uniforme obteniendo una mayor señal, al igual que analizar un mayor número de configuraciones de antenas.

Nosotros hemos querido dar un resultado lo más genérico posible pero siempre hay que tener en cuenta las limitaciones existentes. El cálculo de la matriz de canal es costoso computacionalmente, por lo que las configuraciones elegidas han sido las que creímos que nos iban a aportar una mayor información.

La elección de tres y cinco usuarios se debió a que así podíamos comparar la influencia de las interferencias entre usuarios. Como hemos podido ver, al aumentar el número de usuarios, las interferencias han aumentado. Con ello, también hemos podido concluir que si existe ruido en el sistema, su influencia es mucho mayor para las configuraciones en las que el número de usuarios es menor, ya que a mayor número de usuarios, las interferencias aumentan por lo que el ruido deja de ser tan predominante.

Los resultados obtenidos para la SINR han sido los esperados tras analizar los diagramas de radiación. Al principio, nos sorprendió que al aumentar el número de antenas la SINR no aumentara sino que tuviera picos, es decir, que dependiendo de la configuración obteníamos valores mayores o menores de la SINR. Estas dudas desaparecieron tras analizar los diagramas de radiación para cada configuración como hemos comentado anteriormente.

El análisis de todas las gráficas de la SINR nos ha permitido sugerir aquellas configuraciones que creemos que son mejores dependiendo de la situación en la que nos encontremos, toda esta información la hemos detallado en el comentario de las respectivas figuras de SINR. Cabe mencionar, que no siempre el sistema con mayor número de antenas nos va a proporcionar las mejores prestaciones. En este tipo de sistemas, el aumento del número de antenas por estación base incrementa los costes, por lo que en la implantación de una red de comunicaciones se tiene que tener muy claro que los beneficios van a ser muy significativos para poder realizar ese incremento del número de antenas por array. A fin de cuentas una red estará formada por un número muy significativo de estaciones base, por lo que el aumento, aunque sea de una sola antena por estación base, será muy importante.

Los resultados de la información mutua que hemos obtenido se alejan de los resultados esperados. Los resultados esperados como hemos comentado en el análisis de las figuras de la información mutua, eran que los usuarios que se vieran menos influenciados por las interferencias del resto tuvieran una información mutua mayor, por lo que esperábamos que la información mutua de los usuarios situados en las esquinas fuera mayor que la información mutua de los usuarios centrales. Tras analizar y optimizar lo más posible la implementación de la información mutua no hemos obtenido los resultados esperados.

En definitiva, los resultados obtenidos en este proyecto son una partida para el estudio más detallado de este tipo de sistemas. No cabe duda que explotar el conformado de haz en sistemas MIMO multiusuario es una buena idea, pero lleva



consigo un estudio pormenorizado del espacio y de las diferentes configuraciones que podemos utilizar, ya que en este punto tenemos un sinfín de posibilidades.



7. Bibliografía

- [1] Ezio Biglieri, Robert Calderbank, Anthony Constantinides, Andrea Goldsmith, Arogyaswami Paulraj y H. Vincent Poor
MIMO Wireless Communications
Cambridge University Press, 2005
- [2] Arogyaswami Paulraj, Rohit Nabar y Dhananjay Gore
Introduction to Space-Time Wireless Communications
Cambridge University Press, 2003
- [3] Emanuele De Carolis y Quentin Berder
MIMO: Beamforming for Multicast services in 4G scenario
http://quentinberder.files.wordpress.com/2008/07/project_2.pdf
5 de noviembre de 2009
- [4] *Canales con desvanecimiento variantes en el tiempo*
Asignatura: Sistemas y canales de transmisión, 2004
Universidad Carlos III de Madrid
- [5] Shi Min
An Introduction to MIMO Technology
www.sasase.ics.keio.ac.jp/jugyo/2007/MIMO.pdf
15 de septiembre de 2009
- [6] Francisco José Cano
Array antennas introduction
Universidad Politécnica de Madrid
http://ocw.upm.es/teoria-de-la-senal-y-comunicaciones-1/antenna-design-and-measurement-techniques/contenido/MaterialCursoAthensUPM26/array-antennas-introduction-athens-2009_tuesday.pdf/view
14 de noviembre de 2009
- [7] *Otros tipos de antenas*
<http://proton.ucting.udg.mx/~tonycova/otrasantenas.pdf>
15 de noviembre de 2009
- [8] Dr. Won-Joon Choi, Dr. Qinfang Sun y Dr. Jeffrey M. Gilbert
MIMO Technology for Advanced Wireless Local Area Networks
videos.dac.com/42nd/slides/26-2.ppt
5 de noviembre de 2009

- [9] Masoud Sharif y Babak Hassibi
A Comparison of Time-Sharing, DPC, and Beamforming for MIMO Broadcast Channels with Many Users
IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 55, enero 2007
<http://www.systems.caltech.edu/EE/Faculty/babak/pubs/papers/comparison.pdf>
18 de noviembre de 2009
- [10] Martin Schubert y Holger Boche
Solution of the multiuser downlink beamforming problem with individual SINR constraints
IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 53, no. 1, enero 2004
- [11] Batu K. Chalise y Luc Vandendorpe
A multiuser MIMO transmit beamformer based on the statistics of the Signal-to-Leakage Ratio
EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking
Volumen 2009 (2009), junio 2009
- [12] Matilde Sánchez Fernández, Santiago Zazo y Reinaldo Valenzuela
Performance comparison between beamforming and spatial multiplexing for the downlink in wireless cellular systems
IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 6, no. 7, julio 2007
- [13] Artículo sobre LTE
<http://www.3gpp.org/article/lte>
30 de noviembre de 2009