



Universidad
Carlos III de Madrid

Departamento de Teoría de la señal y comunicaciones

PROYECTO FIN DE CARRERA

Análisis de prestaciones en el enlace ascendente de un sistema celular con espectro ensanchado y MIMO

Autor: Javier Armada Chapa

Tutor: Matilde Sánchez Fernández

Leganés, Mayo de 2013

Agradecimientos

La entrega del Proyecto de Fin de Carrera supone para mí un momento de sentimientos encontrados, por un lado la gran alegría de empezar en plenas condiciones la vida laboral y por otro darme cuenta de que mi vida de estudiante se ha acabado y me hago mayor.

Estos años han sido años de puro y continuo aprendizaje que me han llevado a superarme día tras día, alcanzando metas que dudé seriamente en su momento que llegaría a alcanzar. Todavía recuerdo aquella primera convocatoria de exámenes con el primero que era de álgebra, yo pensaba que me lo sabía para sacar matrícula pero acabé suspendiendo. En ese mismo instante me di cuenta de que esta carrera iba a ser larga y complicada pero el reto fue el que me impulsó para seguir y conseguirlo.

Durante estos años he conocido a innumerables personas sin las cuáles hubiera sido imposible haberlo conseguido. De hecho, desde mi punto de vista, la única manera de llegar a buen puerto en una carrera como esta es apoyándote en todo momento en la gente de tu alrededor. Podría ponerme a decir nombres pero no acabaría y no quiero dejarme a nadie.

Una de las cosas que más he disfrutado en mi carrera, ha sido de la experiencia Erasmus. Por eso, en este punto me gustaría agradecer al SERINT de la universidad porque me ayudaron en todo momento en esa etapa la cuál fue extremadamente enriquecedora a nivel personal convirtiéndome en una persona mucho más abierta y sociable.

Me acuerdo en este momento también de mi tutora. Mati ha sido la tutora perfecta para mí porque siempre que tenía alguna duda (que han sido muchas) me la resolvía por muy absurda que fuera.

También me gustaría acordarme de mis amigos de toda la vida, esos que siempre están ahí y que, aunque no puedan ayudarte con el temario de los exámenes, si te apoyan e intentan ayudarte en lo que sea.

Ya por último no puedo acabar sin acordarme de mi familia, la cual ha estado siempre y en todo momento ahí soportando mis alegrías y mis penas en la montaña rusa que ha supuesto para mí esta, muy complicado pero a la vez muy gratificante carrera universitaria

Resumen

Hoy en día, el principal objetivo en las telecomunicaciones es el poder estar online en cualquier momento y en cualquier lugar. Por ello, las comunicaciones móviles centran la mayoría de la investigación que se está llevando a cabo.

Nuestro principal objetivo en este proyecto es el de intentar implementar una red celular con espectro ensanchado y complementarlo con la tecnología MIMO.

Particularmente, se analizará el enlace ascendente en un sistema celular compuesto por cuatro estaciones base y cuatro usuarios con células hexagonales. Los usuarios y las estaciones base dispondrán de una o más antenas por lo que MIMO jugará un papel muy importante en el proyecto.

Junto a la tecnología MIMO, aparecerá la interferencia multiusuario por lo que las técnicas de detección multiusuario serán estudiadas y aplicadas a lo largo del proyecto.

Se analizarán tres modelos. En todos ellos se observará la salida de los filtros adaptados y de los detectores multiusuario, forzador de ceros y MMSE.

El primero, el modelo más simple donde los usuarios y las estaciones base dispondrán sólo de una antena para transmitir y recibir. En segundo lugar, un escenario en el que los usuarios dispondrán de dos antenas y las estaciones base de una y, por último, un modelo en el que tanto los usuarios como las estaciones base dispondrán de dos antenas.

Abstract

Nowadays, since the main goal in telecommunications is to be online anywhere and at anytime, mobile communications gather most of the research carried out.

Our main objective in this master thesis is to try and implement a cellular network with spread spectrum and complement it with MIMO technology.

Particularly, the uplink channel will be analysed in a cellular system consisting on four users and four base stations with hexagonal cells. Users and base stations will count with one or more antennas so MIMO will take an important role in the thesis.

Together with MIMO technology, multiuser interference will show up so multiuser detection techniques will be studied and applied along the thesis.

Three models will be analysed. In all of them matched filters output will be studied as well as the zero forcing and MMSE multiuser detector output.

First of all, the simplest model where every user and base station will count with only one antenna to transmit and receive. Secondly, a scenario with two antennae in each user and one antenna for each base station and finally the last model where every user and base station will count with two antennae.

Índice general

1. INTRODUCCIÓN	10
1.1 Estado del arte	10
1.2 Motivación y objetivos	11
2. MIMO DENTRO DE LOS SISTEMAS CELULARES	13
2.1 SISTEMAS CELULARES	14
2.2 CDMA COMO SISTEMA DE ACCESO AL MEDIO	15
2.3 PROPAGACIÓN EN ENTORNOS MÓVILES	16
2.3.1 Modelos de propagación	17
2.3.1.1 Gran Escala	17
2.3.1.1.1 Propagación en espacio libre	17
2.3.1.1.2 Propagación en espacio con obstáculos (shadowing)	18
2.3.1.2 PEQUEÑA Escala (desvanecimiento)	19
2.5 MUD MULTIUSER DETECTION	21
2.5.1 Canales síncronos de k usuarios	21
2.5.2 Detector forzador de ceros	22
2.5.3 Detector MMSE	23
3. MODELO DEL SISTEMA	25
3.1 Escenario	26
3.1.1 Canal	26
3.1.2 Espectro ensanchado	26
3.1.3 MIMO	27
3.1.3.1 MIMO 2x1 Alamouti	29
3.1.3.1.1 Caso para un usuario y una estación base	29
3.1.3.1.2 Caso general	30
3.1.3.2 MIMO 2x2	30
3.1.3.2.1 Caso para un usuario y una estación base	31
3.1.3.2.2 Caso general	31
4. RESULTADOS Y SIMULACIONES	32
4.1 Caso SISO	33
4.1.1 Salida filtros adaptados	34
4.1.2 Salida receptor MMSE	36
4.1.3 Salida receptor ZF	38
4.1.4 MMSE vs. ZF	39
4.2 CASO MISO 2x1	40
4.2.1 Salida filtros adaptados	41
4.2.2 Salida receptor MMSE	42
4.2.3 Salida receptor ZF	43

4.2.4 MMSE vs. ZF.....	44
4.2.5 SISO vs. MISO 2x1	45
4.3 CASO MIMO 2x2.....	47
4.3.1 Salida filtros adaptados	49
4.3.2 Salida receptor MMSE.....	50
4.3.3 Salida receptor ZF.....	51
4.3.4 MMSE vs ZF caso MIMO 2x2	52
4.3.5 MIMO vs SISO	53
5. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS.....	54
6. PRESUPUESTO DEL PROYECTO	56
6.1 Recursos humanos	56
6.2 Recursos computacionales	56
BIBLIOGRAFÍA	58

Índice figuras

Figura 1. Detector ZF.....	22
Figura 2. Detector MMSE.....	24
Figura 3. Red de celdas del modelo.....	26
Figura 4. Bits recibidos en una estación base.....	28
Figura 5. Modelo caso SISO.....	33
Figura 6. Diagrama de bloques transmisor.....	33
Figura 7. Diagrama de bloques receptor filtros adaptados.....	34
Figura 8. Diagrama de bloques receptor MMSE.....	36
Figura 9. Modelo caso MIMO 2x1.....	40
Figura 10. Modelo caso MIMO 2x2.....	47
Figura 11. Diagrama de bloques detector caso MIMO 2x2.....	48

Índice gráficas

Gráfica 1. Salida filtros adaptados SISO vs BPSK teórica sobre canal AWGN	34
Gráfica 2. MMSE vs. Filtros adapt para caso SISO	36
Gráfica 3. BER ZF vs. Filtros adapt para caso SISO	38
Gráfica 4. BER MMSE vs. ZF caso SISO	39
Gráfica 5. Salida filtros adaptados MISO 2x1 vs BPSK teórica sobre canal AWGN..	41
Gráfica 6. BER MMSE vs. Filtros adapt para caso MISO 2x1	42
Gráfica 7. BER ZF vs filtros adaptados para caso MISO 2x1	43
Gráfica 8. BER MMSE vs. ZF caso MISO 2x1	44
Gráfica 9. MISO vs. SISO	45
Gráfica 10. Zoom de la gráfica 9	46
Gráfica 11. Salida filtros adaptados MISO 2x1 vs BPSK teórica sobre canal AWGN	49
Gráfica 12. BER MMSE vs. filtros adaptados caso MIMO 2x2	50
Gráfica 13. BER ZF vs. filtros adaptados caso MIMO 2x2.....	51
Gráfica 14. BER MMSE vs. ZF caso MIMO 2x2	52
Gráfica 15. MIMO vs. SISO	53

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Estado del arte

En la actualidad y ya desde hace unos años los dispositivos móviles han adquirido una enorme importancia. Múltiples estudios se realizan acerca de temas directamente relacionados con este aspecto teniendo como objetivo la reducción del ruido y las interferencias, así como el aumento del ancho de banda de la comunicación.

El sistema que ha establecido una base sobre la que fomentar el desarrollo en la comunicaciones móviles es el GSM (Global System for Mobile Communication) [1], el cual se basa en un sistema celular en el que varias estaciones base dan servicio a los usuarios móviles. Partiendo de aquí se han intentado desarrollar un gran número de tecnologías para temas claves como el aumento de ancho de banda, la reducción de interferencias y la posibilidad de copar con más usuarios sin perder calidad de servicio en la comunicación.

Algunos de estos avances se basan en el estudio de las tecnologías de acceso a la red por parte de los usuarios y la posibilidad de incorporar varias antenas tanto a los usuarios como a las estaciones base dando lugar a sistemas MIMO.

Relacionado con tema de acceso a la red, se ha puesto bastante énfasis en el desarrollo del sistema CDMA (*Code Division Multiple Access*) [2] que permite la comunicación simultánea de varios usuarios utilizando el mismo canal por medio del uso de códigos pseudo-aleatorios que los diferencian. WCDMA (*Wireless CDMA*), de la misma familia de tecnologías, ha permitido aumentar el ancho de banda en la comunicación dando lugar a la tercera generación (3G).

En relación a los sistemas MIMO (*Multiple Input Multiple Output*), en la actualidad existen diversos estudios que apuntan a que implantarlo en las redes 4G va a ser la única manera de competir con sistemas como WiMax/802.16 [3] en temas de tasa de transmisión. Sin embargo, la implantación de estos sistemas presenta un gran reto debido a que estos no se llevan bien con los altos niveles de interferencia multi-usuario predominante en este tipo de redes celulares.

En este punto aparece el estudio de la detección multiusuario que será de gran importancia en el futuro cercano para poder unir redes celulares con sistemas MIMO.

1.2 Motivación y objetivos

La principal motivación de este proyecto va a ser el tratar de complementar las tecnologías DS-CDMA ("*Direct Sequence-CDMA*") y MIMO para intentar reducir al máximo la tasa de errores en el enlace ascendente de la comunicación entre usuario y estación base.

El sistema de acceso al medio compartido será el sistema DS-CDMA. Este método de codificación de canal aporta grandes mejoras ya que permite a todos los usuarios del medio el uso de todo el ancho de banda disponible. Hemos implementado un canal síncrono por simplicidad pero simularemos la recepción asíncrona de los bits de los diferentes usuarios en las estaciones base a través del uso de códigos de correlación cruzada baja [4],

Por otro lado, la aplicación de tecnologías MIMO a sistemas de celdas aporta una indudable ventaja respecto a capacidad y mejora de la transmisión pero tiene una desventaja, aplicar esta tecnología aumenta el nivel de interferencias del sistema. Al transmitirse más flujos de datos por el medio, aumenta la interferencia multiusuario, hecho que va en detrimento de la consecución de los objetivos de la introducción de este tipo de sistemas en redes celulares. Por lo tanto, el sistema MIMO podría ir acompañado de un sistema de detección multiusuario que lidie con esa interferencia.

Parte importante de la memoria se va a dedicar al estudio y aplicación de técnicas de detección multiusuario. Tanto el detector forzador de ceros ZF ("*Zero Forcing*"), como el detector MMSE ("*Minimum Mean-Square Error*") serán estudiados e implementados para tratar de eliminar al máximo posible la interferencia multiusuario. Ambos sistemas serán comparados y se explicará porque uno ofrece mejores prestaciones que el otro para determinados valores de relación señal a ruido.

1.3 Estructura de la memoria

La memoria se va a basar en seis grandes apartados. Empezará por una introducción de la que este punto forma parte. Posteriormente constará de un apartado teórico en el que se explicará la teoría relacionada con las técnicas de espectro ensanchado, las técnicas multiusuario y los sistemas MIMO. Seguidamente se dará una panorámica sobre el escenario en el que se ha trabajado con sus elementos.

Una vez explicada la teoría y presentado el escenario de trabajo se expondrán los resultados obtenidos para diferentes casos, se empezará con los resultados de las simulaciones más sencillas avanzando hacia las más complejas.

Por último se añadirá un apartado en el que se incluirán conclusiones del proyecto, posibles líneas futuras, una exposición de los recursos humanos y técnicos utilizados y, por último, la bibliografía.

2. MIMO DENTRO DE LOS SISTEMAS CELULARES

Como se indicó en la introducción de la memoria, este proyecto se va a basar en el estudio de la aplicación de sistemas MIMO en redes celulares de telefonía móvil dentro de un modelo, el cuál será detallado más adelante.

A partir de este punto se tratará de explicar cómo aplicando sistemas MIMO a las redes celulares mejora la comunicación móvil.

La idea del uso de múltiples antenas tanto en transmisión como en recepción supone un gran desafío para las comunicaciones móviles. Durante los últimos quince años múltiples estudios han sido realizados al respecto, teniendo todos en común la idea de que suponen una pieza clave para avanzar hacia transmisiones de mayor ancho de banda.

Frente a un sistema SISO ("*Single Input Single Output*") los sistemas multidimensionales MIMO pueden ser explotados para aumentar la diversidad espacial del sistema o para proporcionar canales paralelos para la comunicación lo que se conoce por multiplexación espacial.

A través de la diversidad espacial se puede luchar contra el desvanecimiento del canal ya que lo que se hace es enviar la misma información por distintos "sitios" siendo más improbable que el desvanecimiento afecte de igual forma a ambos de la misma manera. De esta manera conseguimos mejorar el sistema en términos de tasa de error en la comunicación aportando robustez.

A diferencia de la diversidad espacial, la multiplexación espacial se encarga de dividir los datos en múltiples ráfagas paralelas que son transmitidas por las diferentes antenas aumentando la velocidad de transmisión del sistema y por tanto la capacidad. Es lógico entonces que un buen sistema para el futuro fuera uno que combinara ambas cualidades.

2.1 SISTEMAS CELULARES

Los sistemas o redes celulares aparecieron por la necesidad de una telefonía móvil económicamente viable. Estos se basan en un conjunto de células o celdas colocadas unas junto a otras para cubrir la mayor parte de terreno posible. Cada célula contiene una estación base que es capaz de dar cobertura a una serie de dispositivos dentro de un determinado alcance. La colocación y el alcance de cada célula son minuciosamente estudiados teniendo muy en cuenta si se encuentra en zona rural, urbana, de altas interferencias o de bajas.

El uso de este tipo de sistemas es posible gracias a, entre otras cosas, la reutilización de frecuencias que permite que en células no adyacentes usuarios puedan transmitir a la misma frecuencia.

Otro tema de importancia en este tipo de sistemas es como la estación base de una célula es capaz de diferenciar a los diferentes usuarios dentro de su célula. Esto se consigue gracias a tecnologías de acceso al medio. La que se usó en un principio fue FDMA ("*Frequency Division Multiple Access*") que permitía que una estación base diera servicio a una serie de usuarios utilizando división en frecuencia. Ésta fue poco a poco alternando con CDMA ("*Code Division Multiple Access*"), tecnología que se basa en la diferenciación de usuarios a través del código que utilizan para transmitir, pudiendo estos usar todo el ancho de banda disponible para ello.

2.2 CDMA COMO SISTEMA DE ACCESO AL MEDIO

CDMA se considera una tecnología de espectro ensanchado ya que por cada tiempo de bit se transmiten una serie de chips que forman la secuencia del usuario. Esto provoca que el ancho de banda utilizado para la transmisión sea bastante mayor al necesario, lo que supone una mejora porque el hecho de aumentar el ancho de banda de la transmisión provee resistencia de la comunicación frente a interferencias intencionadas o *Jamming* [5] y frente al desvanecimiento provocado por el multitrayecto, ya que es muy improbable que la señal se tope con fuerte desvanecimiento por multitrayecto en todo el ancho de banda.

En las redes celulares los bits de información de los usuarios son mezclados con las secuencias de chips antes de la transmisión siguiendo los cánones de DS-SS-SS-SS. Debido a la naturaleza del sistema celular el modelo utilizado es el modelo asíncrono "*Asynchronous CDMA*".

La tecnología CDMA se basa en el uso de códigos ortogonales que permiten que la información de cada usuario pueda ser separada en el receptor. Para que esto sea posible las secuencias recibidas han de estar alineadas en el tiempo. Como bien sabemos, en el enlace ascendente de un sistema celular esto es imposible debido a que cada secuencia es generada en un punto de partida aleatorio. Aquí es cuando el CDMA asíncrono se abre paso.

En este sistema se generan una serie de secuencias PN ("*Pseudo Noise*") que son secuencias binarias que parecen aleatorias pero que pueden ser reproducidas de una manera determinista por los receptores. Estas secuencias pasan a desarrollar el papel de las secuencias ortogonales en el caso síncrono. Su uso da lugar a la aparición de términos de MAI ("*Multiple Access Interference*") [6] en el receptor por lo que, a diferencia del caso síncrono, la recepción de la información de un usuario va a estar contaminada por la de los demás en forma de ruido.

2.3 PROPAGACIÓN EN ENTORNOS MÓVILES

Es importante definir el medio sobre el que se propagan las señales en el sistema en el que se trabaja. En un sistema en el que se estudia la comunicación entre un usuario móvil y una estación base múltiples factores entran en juego los cuáles determinan el modelo de propagación de la señales a implementar.

Éste cambia considerablemente si estamos en un ambiente urbano o en uno rural ya que en el primero es difícil que exista una línea directa de visión entre el usuario y la base. Al no existir esa línea de visión las ondas electromagnéticas van a rebotar en edificios, atravesar cristales y verse seriamente afectadas por la polución. Por esto es importante en este punto definir los diferentes fenómenos que una onda electromagnética experimenta al encontrarse con un material en su camino.

Una onda electromagnética al incidir en un material puede experimentar cuatro posibles efectos: reflexión, refracción, difracción y dispersión. La reflexión ocurre cuando la señal encuentra una superficie que es larga comparada con la longitud de onda de la señal (suelo, paredes de edificios) rebotando con ella.

El fenómeno de refracción se da al atravesar la señal la superficie cambiando su dirección debido al cambio de densidad de los medios a ambos lados de ésta.

La difracción se produce al verse la señal obstruida por una superficie que tiene irregularidades puntiagudas inclinándose la onda alrededor de esta.

Por último la dispersión que se da al chocar la señal con un cuerpo cuyo tamaño es menor que la longitud de onda de la señal (poste de la luz, señal de tráfico).

La señal transmitida desde el usuario móvil a la estación base va a rebotar en edificios, chocar contra obstáculos y verse atenuada por aspectos meteorológicos dando lugar a diversos caminos. Esto provoca que en el receptor se reciban varios rayos de diferentes intensidades que llegan en diferentes instantes de tiempo. Para lidiar con todo esto diferentes estudios han sido realizados dando lugar a una serie de modelos de propagación.

2.3.1 Modelos de propagación

Existen dos grandes categorías en las que clasificar los modelos de propagación, los modelos de gran escala y los de pequeña escala. Los primeros predicen el comportamiento de la señal para distancias mucho mayores que la longitud de onda, mientras que los segundos describen las variaciones de la señal para distancias del orden de la longitud de onda de la señal.

2.3.1.1 Gran Escala

Estos modelos dependen de la distancia entre transmisor y receptor, son independientes del ancho de banda y son útiles para modelar el alcance de sistemas radio [7]. Según los obstáculos que existan en el camino la propagación puede ser en espacio libre (ausencia de obstáculos) o con bloqueos, también conocida como shadowing. Diferentes modelos las describen:

2.3.1.1.1 Propagación en espacio libre

Como hemos indicado antes, este modelo sólo es válido cuando no existe ningún obstáculo entre transmisión y recepción. La fórmula que lo define es la fórmula de Friss :

$$P_R(d)[W] = P_T[W]G_TG_R\left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 \quad \text{Ecuación 1}$$

Siendo:

$P_R(d)[W]$: Potencia recibida a una distancia d en Watios

$P_T[W]$: Potencia transmitida en Watios

G_T : Ganancia de la antena transmisora

G_R : Ganancia de la antena receptora

λ : Longitud de onda de la señal

d : Distancia entre transmisor y receptor

Lo que nos importa de esta ecuación son las pérdidas por distancia que son:

$$PL(d) = \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \quad \text{Ecuación 2}$$

Suele ser interesante expresar esta ecuación de dB's:

$$PL(d) = (32.44 + 20\log_{10} d + 20\log_{10} f) \quad \text{Ecuación 3}$$

Es importante reseñar que este modelo sólo es válido para campo lejano por lo que se ha de cumplir que $d \geq \frac{2D^2}{\lambda}$, siendo D la longitud total de la antena. Es útil saber también que existen modelos más precisos que definen la propagación en espacio libre, uno de ellos es el modelo de Okumura-Hata que responde a la siguiente fórmula:

$$PL(d) = 69.55 + 26.16\log(f) - 13.82\log(H_1) + [44.9 - 6.55\log(H_1)]\log(d) - a(H_2) \quad \text{Ecuación 4}$$

Siendo:

f : Frecuencia de la portadora en Mhz

H_1 : Altura de la antena transmisora en metros

H_2 : Altura de la antena receptora

$a(H_2)$: Factor de corrección para la altura efectiva del móvil

d : Distancia entre transmisor y receptor

2.3.1.1.2 Propagación en espacio con obstáculos (shadowing)

Dos grandes modelos aparecen en este apartado, el modelo log-distancia y el modelo log-normal. El primero introduce en la ecuación de las pérdidas del modelo en espacio libre un factor n de la siguiente manera:

$$PL(d)[dB] = PL(d_0)[dB] + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad \text{Ecuación 5}$$

Siendo d_0 una distancia en metros a la que las pérdidas son conocidas.

Dependiendo del entorno en el que nos encontremos el valor de n va a variar, así por ejemplo para entornos urbanos se utiliza un valor de n entre 3 y 5 o para entornos industriales se utiliza un valor de n entre 2 y 3 [7].

Si a este modelo le añadimos una variable aleatoria gaussiana (X_σ) que trata de definir la forma no esférica del rango de la señal transmitida tenemos el modelo log-normal. Este modelo se define por la siguiente fórmula:

$$PL(d)[dB] = PL(d_0)[dB] + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma \quad \text{Ecuación 6}$$

2.3.1.2 PEQUEÑA Escala (desvanecimiento)

Estos modelos estudian el comportamiento de la potencia en distancias comparables a la longitud de onda de la señal. Como ha sido previamente explicado, el hecho de que haya obstáculos en la línea de visión entre el transmisor y el receptor provoca una serie de reflexiones en el camino que dan lugar a una propagación multitrayecto. Esto provoca que en el receptor se reciban varias señales de diferentes intensidades y en diferentes instantes de tiempo (dispersión en el tiempo). Por otro lado si existe movimiento relativo entre transmisor y receptor se produce dispersión Doppler que da lugar a un ensanchamiento en frecuencia.

Dentro de la dispersión en el tiempo (multitrayecto) existen dos tipos de desvanecimiento (fading), el plano y el selectivo en frecuencia. El primero se puede modelar a través de una distribución Rayleigh y conserva el espectro de la señal transmitida mientras que en el segundo, el selectivo en frecuencia, la dispersión Doppler da lugar a ISI ("*Intersymbol Interference*") y no conserva el espectro de la señal transmitida.

En referencia al desvanecimiento selectivo en frecuencia, aparecen el desvanecimiento rápido ("*Fast Fading*") y el desvanecimiento lento ("*Slow Fading*"). El primero se da cuando existe alta dispersión Doppler y el segundo cuando esta es baja.

Entonces es posible tener canales en el que existe desvanecimiento plano y lento o plano y rápido.

2.4 MIMO: MULTIPLE INPUT-MULTIPLE OUTPUT

Ya ha sido explicado que incluir sistemas MIMO en redes celulares aporta grandes beneficios en cuanto a aumento del ancho de banda y disminución de la tasa de errores en la transmisión. En este punto nos centraremos en las diferentes posibilidades de aplicación que esta tecnología ofrece.

La primera posibilidad y la más básica que ofrece MIMO es en la conexión punto a punto, consiste en un solo transmisor y un solo receptor los cuáles pueden contar con varias antenas. Dependiendo del número de antenas utilizadas tanto en el transmisor como en el receptor se puede aumentar el ancho de banda de la conexión, la capacidad o disminuir la tasa de errores en la comunicación.

Otra posibilidad que va cogiendo cada vez más interés es la conexión MIMO punto a multipunto también conocida como MU-MIMO ("*Multiuser-MIMO*") [8]. Consiste en una mejora de la tecnología MIMO que permite que múltiples usuarios móviles accedan a un mismo receptor mejorando la capacidad de comunicación de cada usuario individual.

Existen dos grandes categorías dentro de MU-MIMO, MIMO BC ("*MIMO Broadcast*") y MIMO MAC ("*MIMO Multiple Access Channel*"). La primera representa el caso del enlace descendente que consiste en un único transmisor y varios receptores, en ella es necesario tener conocimiento del estado del canal en el transmisor. Los sistemas MIMO-BC presentan una gran mejora respecto al MIMO punto a punto especialmente cuando el número de antenas en el transmisor es mayor que el número de antenas receptoras en cada usuario. La segunda, MIMO MAC, representa el caso del enlace ascendente consistiendo en múltiples transmisores y un solo receptor. En este caso la mayoría del procesamiento se realiza en el receptor y es necesario conocer el estado del canal en este. MIMO-MAC mejora mucho el rendimiento del sistema MIMO punto a punto sobre todo si el número de antenas receptoras es mayor que el número de antenas en cada transmisor.

2.5 MUD MULTIUSER DETECTION

La introducción de sistemas MIMO en redes celulares aporta grandes beneficios en la comunicación entre usuarios y estaciones base, sin embargo al aumentar el número de canales espaciales entre usuario y estación base introduce mayores niveles de interferencia. Este tipo de interferencia se suele denominar MAI ("*Multiple Access Interference*") y se basa en la interferencia que múltiples usuarios generan unos entre otros tratando de acceder al mismo receptor. Queda claro entonces que si queremos introducir MIMO en sistemas celulares tenemos que lidiar con esa interferencia.

Las mejoras que introduce MU-MIMO se basan en la aplicación de MUD ("*Multiuser Detection*") [9] en el receptor con el objetivo de eliminar el término de interferencia MAI. Este apartado se va a encargar de explicar las técnicas de detección mutiusuario que son necesarias para sacar todo el provecho de MU-MIMO.

La detección mutiusuario se puede clasificar en dos grandes categorías dependiendo del canal en el que se realice. Detección mutiusuario para canales síncronos y para canales asíncronos. En este proyecto asumiremos siempre que los canales son síncronos por lo que los segundos no van a ser estudiados.

2.5.1 Canales síncronos de k usuarios

La señal recibida a la salida de los filtros adaptados en un sistema CDMA síncrono responde a la siguiente ecuación:

$$y_k = A_k b_k + \sum_{j \neq k} A_j b_j \rho_{jk} + n \quad \text{Ecuación 7}$$

Siendo:

A_k : Canal que une el usuario k con el receptor

b_k : Bit transmitido por el usuario k

ρ_k : Señal firma del usuario k

n : Ruido gaussiana aleatorio en el receptor

En la ecuación 7 se puede observar claramente que el segundo término se corresponde con el término de MAI ("*Multiple Access Interference*") que depende de la correlación entre los diferentes usuarios. Otra forma de expresar esto mismo es a través de la siguiente fórmula matricial:

$$\bar{y} = \bar{R}\bar{A}\bar{b} + \bar{n} \quad \text{Ecuación 8}$$

En la ecuación 8 la matriz \bar{R} representa la matriz de correlación entre los diferentes usuarios, \bar{A} es una matriz diagonal con las intensidades de los canales que unen cada uno de los usuarios con el receptor y \bar{b} es un vector con los bits de cada uno de los usuarios.

Utilizando esta notación matricial se puede explicar con más facilidad la detección multiusuario.

2.5.2 Detector forzador de ceros

Uno de los detectores multiusuario más sencillo es el forzador de ceros o "Zero Forcing Receiver". Este se basa en premultiplicar la ecuación anterior por la pseudoinversa de la matriz de correlación \bar{R} de la siguiente manera:

$$\bar{w} = \bar{R}^{-1} \quad \text{Ecuación 9}$$

$$\bar{w}\bar{y} = \bar{R}^{-1}(\bar{R}\bar{A}\bar{b} + \bar{n}) = \bar{A}\bar{b} + \bar{R}^{-1}\bar{n} \quad \text{Ecuación 10}$$

La figura 1 aporta una idea de lo que estamos realizando:

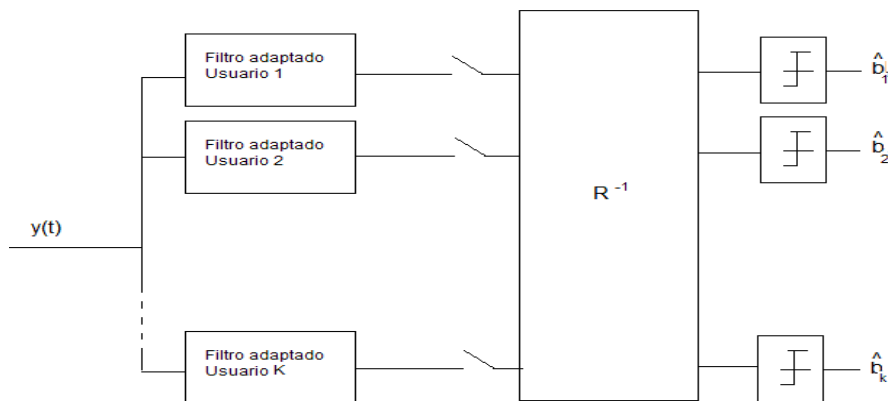


Figura 1. Detector ZF

De esta manera, como podemos observar en la ecuación 10, desacoplamos los datos recibidos con la desventaja de multiplicar el ruido por un factor \bar{R}^{-1} . Una vez desacoplados los datos de los usuarios se decide de la siguiente forma:

$$\hat{b} = \text{sgn}(\bar{A}\bar{b} + \bar{R}^{-1}\bar{n}) \quad \text{Ecuación 11}$$

2.5.3 Detector MMSE

Otro detector muy utilizado es el detector MMSE, este es un detector lineal que pesa el estadístico \bar{y} con un vector \bar{w} para obtener el estadístico de decisión. Nuestra función objetivo para obtener un detector MMSE lineal para b_1 es la siguiente:

$$\Psi(w_1, w_2, \dots, w_k) = E \left\{ \left(b_1 - \sum_{i=1}^K w_i y_i \right)^2 \right\} \quad \text{Ecuación 12}$$

En la que (w_1, w_2, \dots, w_k) son los pesos sobre los estadísticos recibidos (y_1, y_2, \dots, y_k) .

La ecuación 12 se puede representar de la siguiente manera:

$$\Psi(\bar{w}) = E \left\{ \left(b_1 - \bar{w}^T \bar{y} \right)^2 \right\} \quad \text{Ecuación 13}$$

Desarrollando la ecuación 13 obtenemos:

$$\Psi(\bar{w}) = 1 - 2\bar{w}^T E(b_1 \bar{y}) + \bar{w}^T E(\bar{y} \bar{y}^T) \bar{w} \quad \text{Ecuación 14}$$

Ahora volviendo a la notación matricial $\bar{y} = \bar{R}\bar{A}\bar{b} + \bar{n}$ calculamos $E(b_1 \bar{y})$ obteniendo:

$$E(b_1 \bar{y}) = \begin{bmatrix} \rho_{11} A_1 \\ \rho_{21} A_1 \\ \vdots \\ \rho_{K1} A_1 \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 15}$$

Ahora calculamos el otro término $E(\bar{y} \bar{y}^T)$ obteniendo:

$$E(\bar{y} \bar{y}^T) = \bar{R}\bar{A}\bar{R} + N_0 \bar{R} \quad \text{Ecuación 86}$$

Siendo N_0 la varianza de ruido en el receptor.

Sustituyendo en la ecuación 14 obtenemos:

$$\Psi(\bar{w}) = 1 - 2\bar{w}^T [\rho_{11} A_1 \quad \rho_{21} A_1 \quad \dots \quad \rho_{K1} A_1]^T + 2\bar{w}^T \left(\bar{R}\bar{A}\bar{R} + N_0 \bar{R} \right) \bar{w} \quad \text{Ecuación 97}$$

Para minimizar la ecuación 17 obtenemos su derivada y la igualamos a cero obteniendo:

$$-2[\rho_{11}A_1 \quad \rho_{21}A_1 \quad \dots \quad \rho_{K1}A_1]^T + 2(\overline{RA} \overline{R} + N_0 \overline{R})\overline{w}_{opt} = 0 \quad \text{Ecuación 108}$$

$$\overline{w}_{opt} = \overline{RA} \overline{R} + N_0 \overline{R} [\rho_{11}A_1 \quad \rho_{21}A_1 \quad \dots \quad \rho_{K1}A_1]^T \quad \text{Ecuación 19}$$

Generalizando obtenemos la \overline{w}_{opt} por la que hay que multiplicar a la \overline{y} en el detector MMSE:

$$\overline{w}_{opt} = (\overline{R} + N_0 A^{-2})^{-1} \text{ con } N_0 A^{-2} = \text{diag} \left\{ \frac{N_0}{A_1^2}, \frac{N_0}{A_2^2}, \dots, \frac{N_0}{A_K^2} \right\} \quad \text{Ecuación 20}$$

La figura 2 da una idea de un detector MMSE:

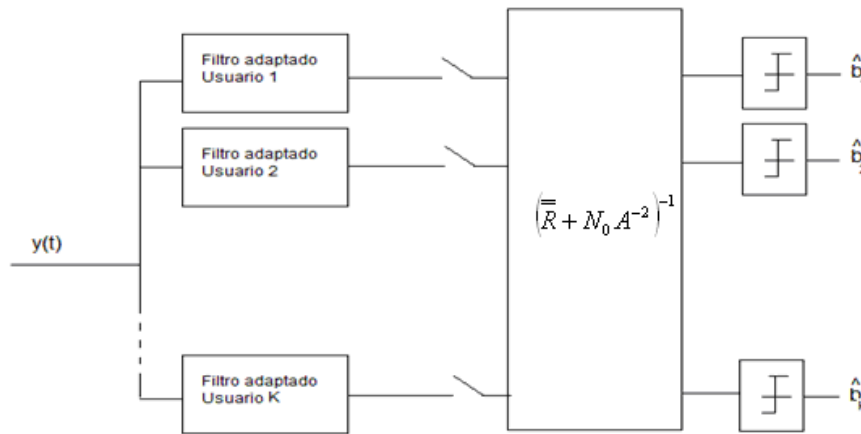


Figura 2. Detector MMSE

El detector lineal MMSE lleva un paso más adelante al detector forzador de ceros incorporando información sobre la SNR a la matriz de correlación \overline{R} . Esto provoca que a la hora de analizar la BER el funcionamiento de MMSE sea mejor que el de ZF para bajas SNRs. También debemos tener en cuenta que cuando $SNR \rightarrow \infty$ (ausencia de ruido) el operador de MMSE tiende al operador de ZF:

$$(\overline{R} + N_0 A^{-2})^{-1} \rightarrow \overline{R} \quad \text{Ecuación 21}$$

3. MODELO DEL SISTEMA

En este apartado procederemos a explicar el modelo del sistema a estudiar explicando todas las características de este. Lo primero será definir el escenario sobre el que vamos a trabajar. En esta primera parte detallaremos el número de usuarios y estaciones base en el sistema así como la disposición y las características de las celdas.

Una vez el escenario ha sido definido, nos dispondremos a detallar aspectos relacionados con las características del medio que nos guíen a la definición del canal a implementar. También estudiaremos las técnicas de acceso al medio que van a ser utilizadas y relacionado con esto el ensanchado de las señales.

La concepción del escenario como un sistema MIMO y las diferentes combinaciones de número de antenas tanto en transmisión como en recepción serán analizadas. Junto a esto se estudiarán las técnicas de detección multiusuario que serán utilizadas para el beneficio del sistema completo.

3.1 Escenario

El escenario del modelo consta de una red celular con cuatro celdas y con un usuario en cada celda. No existe reutilización de frecuencia entre ellas y el enlace de comunicación que estudiaremos es el de subida o "*Uplink*" (conexión entre usuario y estación base). Las celdas son celdas hexagonales y tiene un radio de 100 metros. La siguiente figura muestra una idea de la red de celdas del modelo:

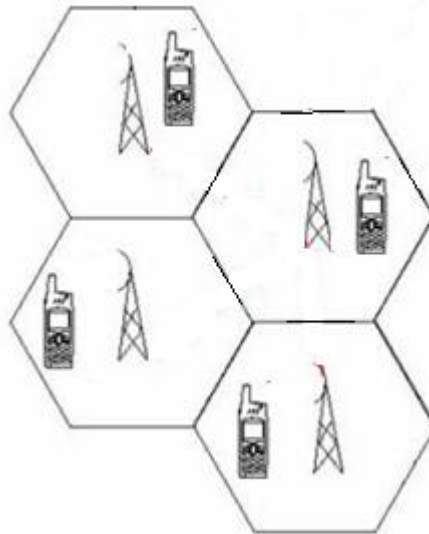


Figura 3. Red de celdas del modelo

3.1.1 Canal

Para el modelado del canal asumiremos que los usuarios no se mueven y que modelamos el desvanecimiento plano. El multitrayecto del canal se va a simular con una distribución Rayleigh y la atenuación a gran escala de la conexión entre usuarios y estaciones base se simulará a través del modelo log-normal. Hemos decidido que el escenario tenga lugar en un ambiente urbano por lo que para el modelo log-normal utilizamos un valor de $n=3.8$. También es importante reseñar que se asume que el canal es síncrono, los códigos de todos los usuarios se reciben alineados.

3.1.2 Espectro ensanchado

Cada usuario va a tener un código diferente al resto. Los códigos utilizados son los "*Gold Codes*" que son códigos no ortogonales pseudo aleatorios de baja correlación entre sí. Utilizando estos códigos se intenta simular un canal asíncrono en el que cada usuario transmite en un instante determinado de tiempo diferente al resto por lo que el receptor no los recibe alineados.

Estos códigos van a ser de longitud treinta y uno por lo que cada bit enviado por cada usuario se dividirá en el envío de treinta y un chips transformándose el vector enviado en una matriz:

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} b_1 s_{11} & b_1 s_{12} & \dots & b_1 s_{131} \\ b_2 s_{21} & b_2 s_{22} & \dots & b_2 s_{231} \\ b_3 s_{31} & b_3 s_{32} & \dots & b_3 s_{331} \\ b_4 s_{41} & b_4 s_{42} & \dots & b_4 s_{431} \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 22}$$

Posteriormente en recepción la matriz recibida se desensanchará sumando todos los elementos de cada fila para dividirlo posteriormente entre treinta y uno.

La matriz de correlación $\overline{\overline{R}}$ del modelo matricial antes explicado se genera a partir de la matriz formada por el *Gold Code* de cada usuario de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & \dots & s_{131} \\ s_{21} & s_{22} & \dots & s_{231} \\ s_{31} & s_{32} & \dots & s_{331} \\ s_{41} & s_{42} & \dots & s_{431} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_{11} & s_{21} & s_{31} & s_{41} \\ s_{12} & s_{22} & s_{32} & s_{42} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ s_{131} & s_{231} & s_{331} & s_{431} \end{bmatrix} = \overline{\overline{R}} \quad \text{Ecuación 23}$$

Esta multiplicación simula lo que ocurre en los filtros adaptados donde cada código es multiplicado por su conjugado apareciendo en ese punto los términos de MAI.

3.1.3 MIMO

La red celular planteada en este proyecto va a ser estudiada desde un principio como un sistema MIMO multiusuario. El enlace a estudiar es el enlace ascendente de la comunicación (usuario -> estación base) por lo que nos encontramos con el caso MIMO MAC (*MIMO Multiple Access Channel*) el cuál es un caso particular de MU-MIMO en el que hay múltiples transmisores y un solo receptor. En el escenario de este proyecto asumimos que todas las estaciones base están interconectadas por lo que comparten información, esto hace posible considerarlo como un único receptor con cuatro antenas en vez de cuatro con una antena cada uno. Para que este modelo se asemeje a la realidad hay que ser cuidadosos a la hora de calcular la varianza de ruido en cada estación base (cada antena del único receptor imaginario) teniendo en cuenta tanto la localización de usuarios y estaciones base como la SNR (*Signal to Noise Ratio*) del sistema.

El modelo simple consiste en usuarios y estaciones base con una sola antena. Aquí es importante explicar cómo se modela el ruido en las estaciones base. En cada estación base se ha tenido cuenta que cada una de ellas recibe bits de los cuatro usuarios como indica la siguiente figura:

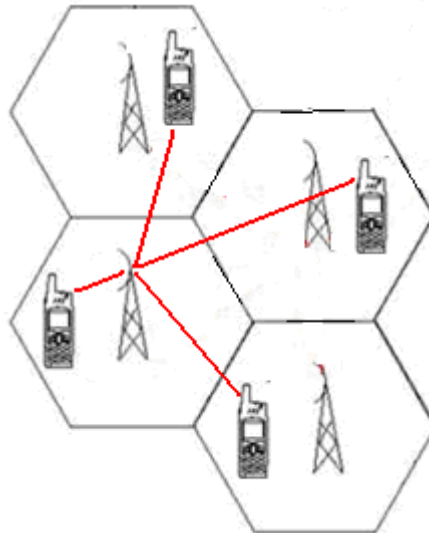


Figura 4. Bits recibidos en una estación base

Entonces para obtener la varianza del ruido en una estación base para una determinada SNR se calcula la atenuación en potencia experimentada por el usuario más lejano a la estación base y con ese valor y el valor de la SNR requerida se calcula la varianza de ruido en la estación de la siguiente manera:

$$N_0 = \frac{\text{Atenuación}^2}{\text{SNR}} \quad \text{Ecuación 24}$$

Esta N_0 se calcula para las cuatro estaciones base generando un vector de varianzas.

En este tipo de esquema la mayoría de procesamiento se hace en las estaciones base que se asumen interconectadas entre sí (comparten la información). Por lo tanto en recepción las estimaciones de los bits enviados se obtienen a través de detección multiusuario. El vector \bar{y} tiene la siguiente forma:

$$\bar{y} = \bar{H}^H \bar{R} \bar{H} \bar{b} + \bar{H}^H \bar{n} \quad \text{Ecuación 25}$$

Siendo \bar{H} la matriz del canal.

Es importante observar en la ecuación 25 que la señal recibida ha sido multiplicada por la conjugada del canal para mantener la coherencia ya que se asume conocimiento del canal por el receptor (CSIR "Channel State Info at the Receiver"). Entonces la detección multiusuario a través de un detector forzador de ceros y para una modulación BPSK se realiza así:

$$\hat{b} = \text{sgn} \left((\bar{H}^H \bar{R} \bar{H})^{-1} \bar{y} \right) \quad \text{Ecuación 26}$$

Mientras que a través de un detector MMSE sería así:

$$\hat{b} = \text{sgn} \left((\bar{H}^H \bar{R} \bar{H} + \bar{R}_n)^{-1} \bar{y} \right) \quad \text{Ecuación 27}$$

Siendo \bar{R}_n la matriz con los elementos de la diagonal igual a las varianzas de los ruidos de cada estación base.

Una vez definido el modelo simple en el que cada usuario y cada estación constan de una sola antena, pasamos a estudiar escenarios en los que son añadidas varias antenas a ambos extremos.

3.1.3.1 MIMO 2x1 Alamouti

En este modelo cada usuario va a constar con dos antenas mientras que cada estación base constará con una, de esta manera lo que se quiere conseguir es aumentar el número de caminos entre transmisor y receptor.

Entonces si se envía el mismo bit por las dos antenas de un usuario, al pasar este por dos canales diferentes es más posible que uno de ellos no sufra un desvanecimiento o "fading" severo mejorándose la calidad de la transmisión. Para explicar cómo funciona este tipo de modelo primero trataremos el caso más simple en el que tenemos un usuario y una estación base.

3.1.3.1.1 Caso para un usuario y una estación base

Si tuviéramos una sola antena tanto en el transmisor como en el receptor la transmisión se basaría en transmitir b_1 en el primer slot de tiempo, b_2 en el segundo y así sucesivamente. Con Alamouti 2x1 tenemos dos antenas en el transmisor por lo que podemos transmitir en el primer slot de tiempo b_1 y b_2 , en la segundo $-b_2^*$ y b_1^* , en el tercero b_3 y b_4 y así sucesivamente. Hay que darse cuenta que enviamos dos bits en cada slot pero repetimos el envío de esos mismos bits en el siguiente por lo que no hay cambio en la velocidad

de transmisión. Entonces en el primer y en el segundo slot de tiempo se recibe en el receptor:

$$y_1 = h_1 x_1 + h_2 x_2 + n_1 \quad y_2 = -h_1 x_2^* + h_2 x_1^* + n_2 \quad \text{Ecuación 28}$$

Ambas ecuaciones se pueden acomodar en la ecuación matricial siguiente:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 \\ h_2^* & -h_1^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2^* \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 29}$$

A partir de la ecuación 29, obteniendo la matriz de canal necesaria y aplicando detección multiusuario se puede obtener el vector estimado $\begin{bmatrix} \hat{b}_1 \\ \hat{b}_2 \end{bmatrix}$.

3.1.3.1.2 Caso general

Según lo mostrado antes, lo que hay que conseguir es la matriz de canal y el vector de ruido adecuados. Al tener cuatro usuarios cada uno con dos antenas la matriz de canal ha de tener la siguiente forma:

$$\overline{\overline{H}} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} & h_{14} & h_{15} & h_{16} & h_{17} & h_{18} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} & h_{24} & h_{25} & h_{26} & h_{27} & h_{28} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} & h_{34} & h_{35} & h_{36} & h_{37} & h_{38} \\ h_{41} & h_{42} & h_{43} & h_{44} & h_{45} & h_{46} & h_{47} & h_{48} \\ h_{12}^* & -h_{11}^* & h_{14}^* & -h_{13}^* & h_{16}^* & -h_{15}^* & h_{18}^* & -h_{17}^* \\ h_{22}^* & -h_{21}^* & h_{24}^* & -h_{23}^* & h_{26}^* & -h_{25}^* & h_{28}^* & -h_{27}^* \\ h_{32}^* & -h_{31}^* & h_{34}^* & -h_{33}^* & h_{36}^* & -h_{35}^* & h_{38}^* & -h_{37}^* \\ h_{42}^* & -h_{41}^* & h_{44}^* & -h_{43}^* & h_{46}^* & -h_{45}^* & h_{48}^* & -h_{47}^* \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 30}$$

Mientras que la varianza del ruido tanto para n_1 como para n_2 será el vector de varianzas $\overline{N_0}$.

$$\overline{N_0} = [N_{01} \quad N_{02} \quad N_{03} \quad N_{04} \quad N_{01}^* \quad N_{02}^* \quad N_{03}^* \quad N_{04}^*]^T \quad \text{Ecuación 31}$$

3.1.3.2 MIMO 2x2

Este modelo consta de dos antenas en cada usuario y dos antenas en cada estación base. En este caso la velocidad de transmisión se dobla ya que se transmiten el doble de bits en cada slot de tiempo. Como antes, explicaremos primero el caso más sencillo.

3.1.3.2.1 Caso para un usuario y una estación base

Al tener dos antenas tanto en el transmisor como el receptor en el primer slot de tiempo se transmiten b_1 y b_2 , en el segundo b_3 y b_4 y así sucesivamente. Entonces en el receptor en el primer slot de tiempo se recibe:

$$y = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 32}$$

Entonces a través de un forzador de ceros o de un detector MMSE se puede obtener el vector estimado $\begin{bmatrix} \hat{b}_1 \\ \hat{b}_2 \end{bmatrix}$.

3.1.3.2.2 Caso general

Ahora en el caso general al tener cuatro usuarios con dos antenas cada uno, la matriz de canal queda de la siguiente forma:

$$\overline{\overline{H}} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} & h_{14} & h_{15} & h_{16} & h_{17} & h_{18} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} & h_{24} & h_{25} & h_{26} & h_{27} & h_{28} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} & h_{34} & h_{35} & h_{36} & h_{37} & h_{38} \\ h_{41} & h_{42} & h_{43} & h_{44} & h_{45} & h_{46} & h_{47} & h_{48} \\ h_{51} & h_{52} & h_{53} & h_{54} & h_{55} & h_{56} & h_{57} & h_{58} \\ h_{61} & h_{62} & h_{63} & h_{64} & h_{65} & h_{66} & h_{67} & h_{68} \\ h_{71} & h_{72} & h_{73} & h_{74} & h_{75} & h_{76} & h_{77} & h_{78} \\ h_{81} & h_{82} & h_{83} & h_{84} & h_{85} & h_{86} & h_{87} & h_{88} \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 33}$$

Ahora es importante determinar bien el vector de varianzas de ruido, este tendrá la siguiente forma:

$$\overline{N_o} = [N_{01} \ N_{01} \ N_{02} \ N_{02} \ N_{03} \ N_{03} \ N_{04} \ N_{04}]^T \quad \text{Ecuación 34}$$

Siendo N_{0i} la varianza de ruido calculada para la estación base i teniendo en cuenta la atenuación sufrida por el usuario más lejano a esa estación y la SNR del sistema.

4. RESULTADOS Y SIMULACIONES

El estudio de los resultados y simulaciones se va a estructurar en tres partes. Primero se analizarán los resultados del sistema en el que tanto usuarios como estaciones base constan de una sola antena (caso SISO). Seguidamente se estudiará el caso en el que los usuarios constan con dos antenas y las estaciones base con una (caso MISO 2x1). Finalmente se analizará el caso en el que tanto usuarios como estaciones base constan con dos antenas (caso MIMO 2x2).

Dentro de cada caso se estudiará primero la salida de los filtros adaptados sin ningún tipo de detección multiusuario. En esta primera parte la curva de la BER será comparada con la curva teórica de una modulación BPSK que tomaremos como referencia. De esta manera será posible observar los problemas derivados de la interferencia entre usuarios y el desvanecimiento del canal.

Después se analizarán las mejoras que se consiguen al añadir a la salida de los filtros adaptados un detector multiusuario de tipo MMSE y otro de tipo ZF. Acabaremos el análisis de cada caso comparando ambos tipos de detectores multiusuario incluyendo en los dos últimos casos una comparación con el caso SISO.

4.1 Caso SISO

Para tener una mejor idea del caso al que nos enfrentamos y como va a ser estudiado, la siguiente figura ilustra el modelo:

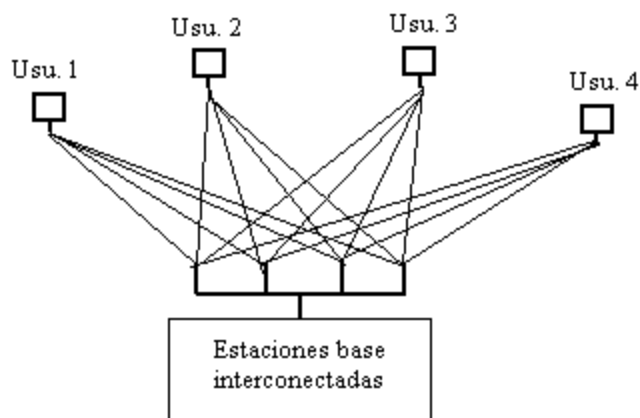


Figura 5. Modelo caso SISO

En este caso para cada simulación en Matlab cada usuario transmitirá 10000 bits haciendo un total de 40000 bits entre los cuatro usuarios. Una vez generados los bits de manera aleatoria, pasarán por un modulador BPSK (+1,-1) para después ser mezclados con el código Gold correspondiente. De esta manera en cada tiempo de bit se transmitirán treinta y un chips (espectro ensanchado). Esta ráfaga de chips pasará a través del canal modelado anteriormente sufriendo el consecuente desvanecimiento por multitrayecto y por distancia siendo recibida en las estaciones base.

El módulo de recepción en las estaciones bases constará en su primera etapa por un sistema de filtros adaptados y de desensanchado. Esta etapa se encargará de discriminar a cada usuario por su código (aparece MAI) y de desensanchar las secuencias recibidas. Después de esta etapa estarán los decisores BPSK. El diagrama de bloques del transmisor es común para las tres partes de este caso y es el siguiente:

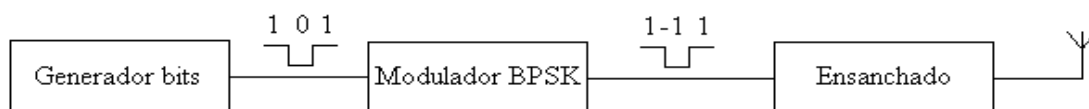


Figura 6. Diagrama de bloques transmisor

En este caso, desde el punto de vista de comunicación punto a punto estamos delante de un modelo SISO, mientras que si lo miramos desde un punto de vista global el modelo es MIMO.

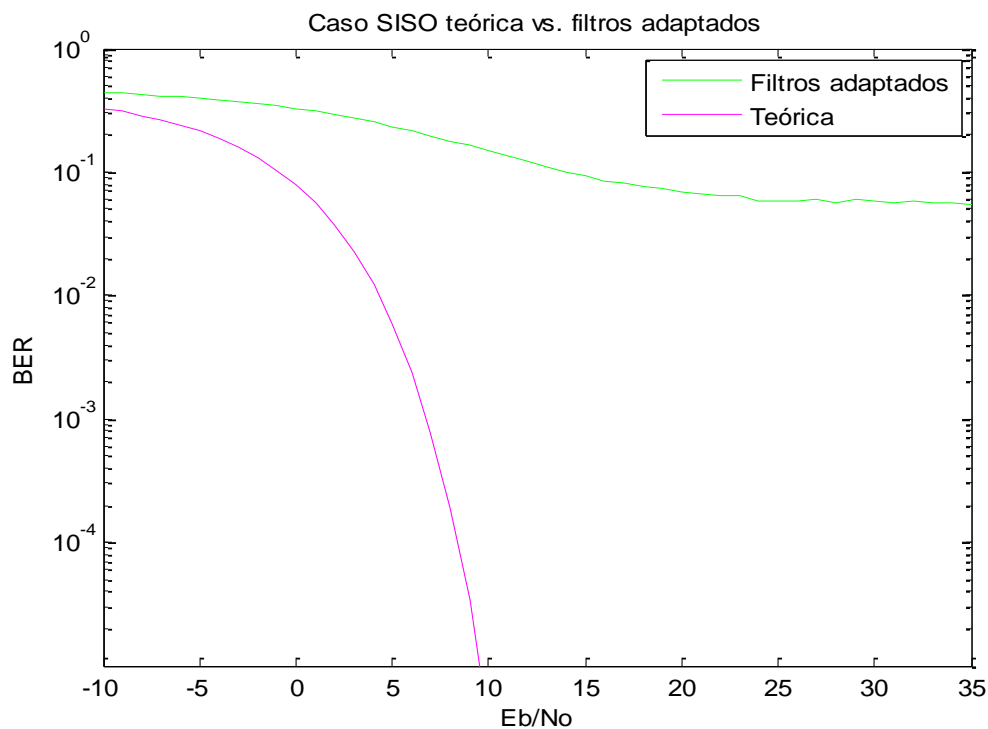
4.1.1 Salida filtros adaptados

Un receptor cuya salida son los filtros adaptados tiene el siguiente diagrama de bloques:



Figura 7. Diagrama de bloques receptor filtros adaptados

Como ha sido indicado en la introducción del capítulo la curva BER generada a la salida de los filtros adaptados será comparada con la curva de una BPSK sobre un canal AWGN teórico.



Gráfica 1. Salida filtros adaptados SISO vs BPSK teórica sobre canal AWGN

Con la gráfica 1 se quiere mostrar el efecto que tiene sobre la curva BER el modelo de canal utilizado y la interferencia multiusuario reinante.

Hasta cierto valor de E_b/N_0 ambas curvas siguen una tendencia parecida con menor pendiente en el caso de la curva de nuestro sistema. Esta tendencia, en el caso de nuestra curva simulada, cambia cuando esta se satura por la interferencia multiusuario del sistema. También hay que notar que la BPSK teórica es punto a punto y se ha implementado sobre un canal AWGN diferente del de nuestro sistema, es por esto que cuando ambas curvas siguen la tendencia descendente los valores de la BER simulada son peores que los de la teórica.

4.1.2 Salida receptor MMSE

Si ahora disponemos de un receptor MMSE el diagrama de bloques del receptor es el siguiente:

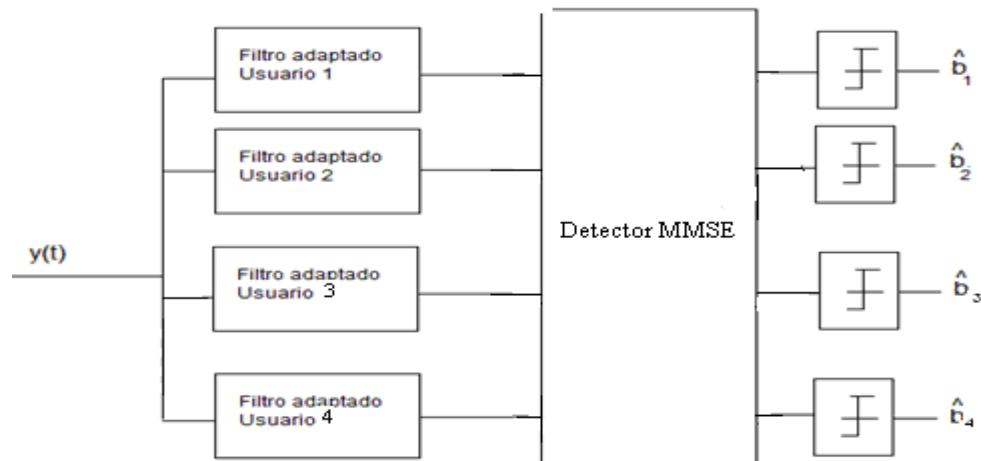
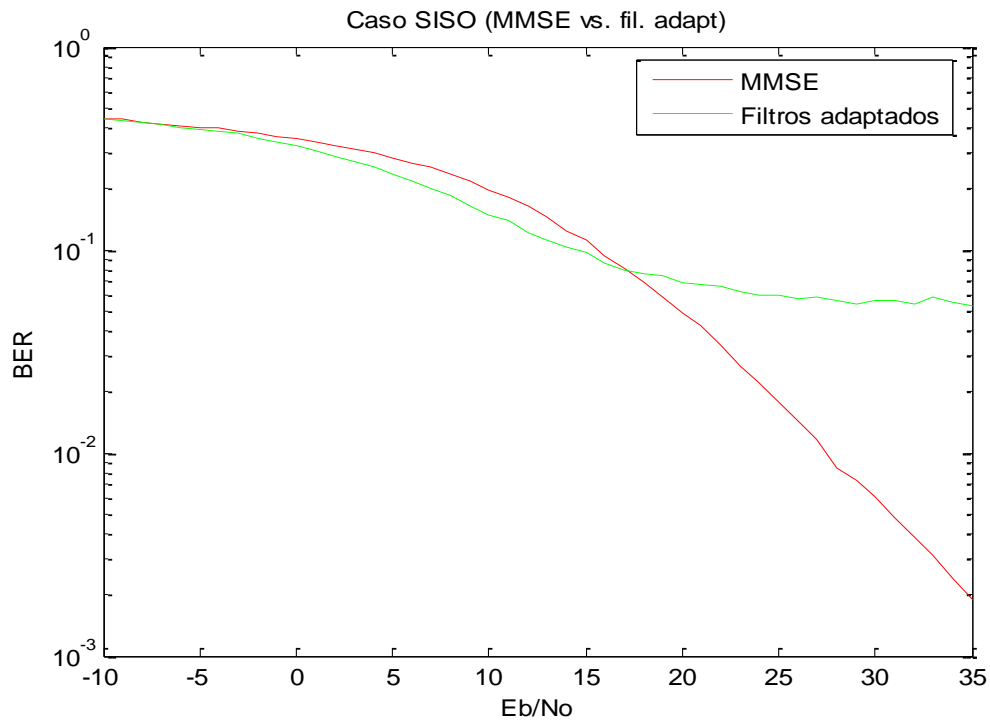


Figura 8. Diagrama de bloques receptor MMSE

La mejora experimentada al incluir el receptor multiusuario MMSE va a ser estudiada ahora. Para ello nos apoyaremos en la gráfica 2:



Gráfica 2. MMSE vs. Filtros adapt para caso SISO

Es importante observar que a bajos niveles de E_b/N_0 el detector de filtros adaptados funciona mejor que el detector MMSE. Para explicar esto nos tenemos que apoyar en dos premisas, por un lado al aplicar un detector de tipo MMSE a la salida de los filtros adaptados ocurre lo siguiente con el ruido:

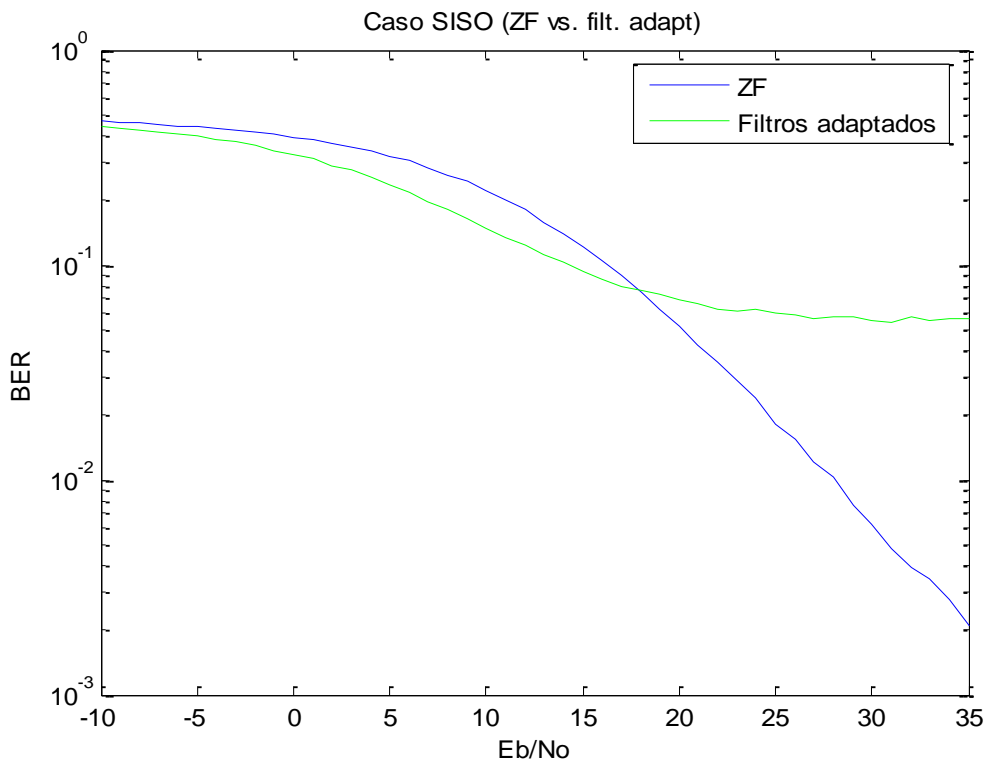
$$\bar{n}_{MMSE} = \left(\bar{R} + N_0 A^{-2} \right)^{-1} \bar{n} \quad \text{Ecuación 35}$$

El ruido aumenta por un factor $\left(\bar{R} + N_0 A^{-2} \right)^{-1}$. Por otro lado, para valores bajos de E_b/N_0 el término de ruido del sistema es mucho mayor que el ruido que añade el término de interferencia multiusuario (MAI). Entonces teniendo en cuenta esto, para valores pequeños de E_b/N_0 el hecho de eliminar la interferencia multiusuario (MAI) a través del detector MMSE con el consecuente aumento de ruido hace que se obtengan peores resultados de BER que a la salida de los filtros adaptados.

Si bien, cuando el término de MAI empieza a tener un tamaño comparable al del ruido del sistema, eliminarlo si supone una mejora considerable frente a la salida de los filtro adaptados ya que a partir de un determinado valor de E_b/N_0 la curva de la BER en esta salida se satura.

4.1.3 Salida receptor ZF

El diagrama de bloques del receptor ZF es idéntico al de la figura 8 sólo que con un detector ZF en vez de un MMSE. Al igual que en el caso de la salida del receptor MMSE, estudiaremos la mejora experimentada al incluir un receptor multiusuario ZF. La BER es la siguiente:



Gráfica 3. BER ZF vs. Filtros adapt para caso SISO

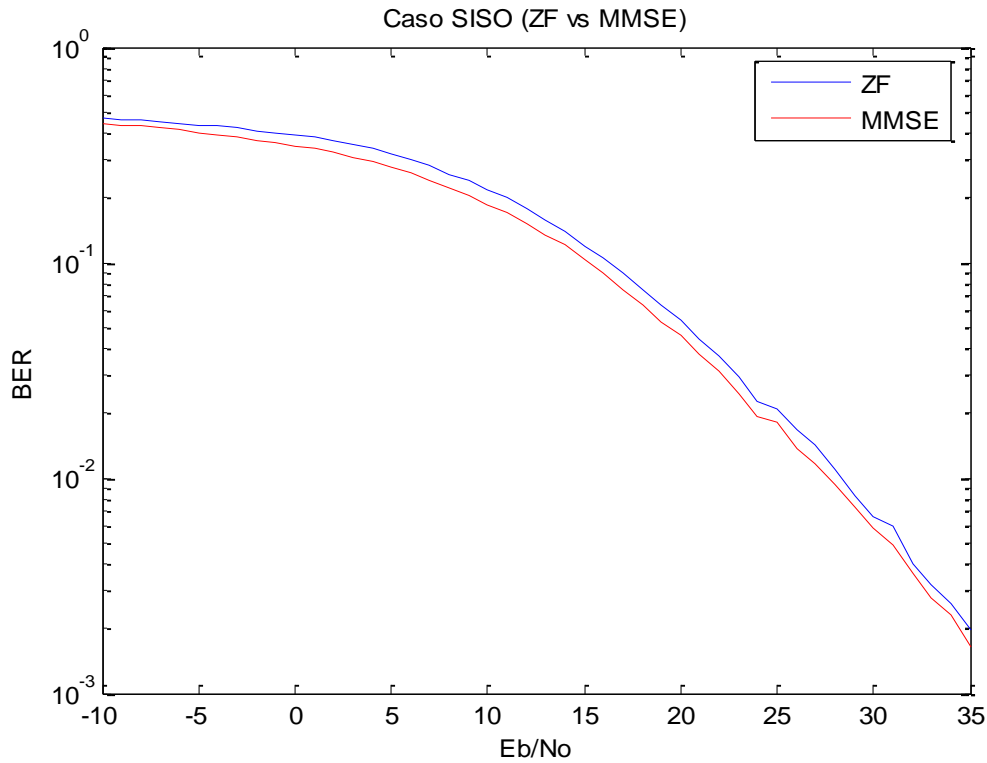
En este caso, para valores de E_b/N_0 bajos la diferencia entre ambas curvas es mayor. Esto se debe a que ahora el ruido resultante es el siguiente:

$$\bar{n}_{MMSE} = \bar{R}^{-1}\bar{n} \quad \text{Ecuacion 36}$$

El ruido ahora es algo mayor porque no se tiene en cuenta la varianza de este en el término que lo multiplica. Esto hace que la curva del MMSE sea mejor que la del ZF como veremos más en detalle en el siguiente punto.

4.1.4 MMSE vs. ZF

Falta por comparar el comportamiento de los dos detectores multiusuario analizados para lo que nos vamos a apoyar en la gráfica 4.



Gráfica 4. BER MMSE vs. ZF caso SISO

La mejora que incluye el detector MMSE frente al ZF es que el primero tiene en cuenta el ruido del sistema. A valores bajos de E_b/N_0 el nivel de ruido es equiparable al de la señal por lo que el detector MMSE ofrece mejores prestaciones que el detector ZF. En cambio a medida que nos acercamos a mayores valores de E_b/N_0 la potencia de ruido va disminuyendo considerablemente por lo que la BER del detector MMSE va tendiendo a ser la misma que la de un detector ZF. Esto último se explica en la ecuación 21.

4.2 CASO MISO 2x1

Como en el caso SISO lo primero será mostrar una representación del sistema:

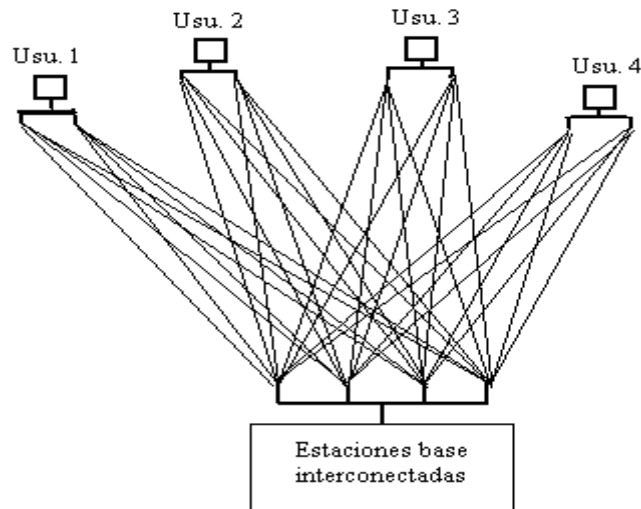


Figura 9. Modelo caso MIMO 2x1

En este caso disponemos de dos antenas en cada usuario y de una en cada estación base. En esta simulación cada usuario transmitirá 18000 bits sumando un total de 72000 bits los cuales seguirán el mismo proceso de ensanchado y desensanchado que en el caso anterior sólo que ahora tenemos ocho secuencias gold de treinta y un chips cada una, una por cada antena transmisora. La modulación utilizada será la BPSK y el canal utilizado será el definido en la ecuación 31.

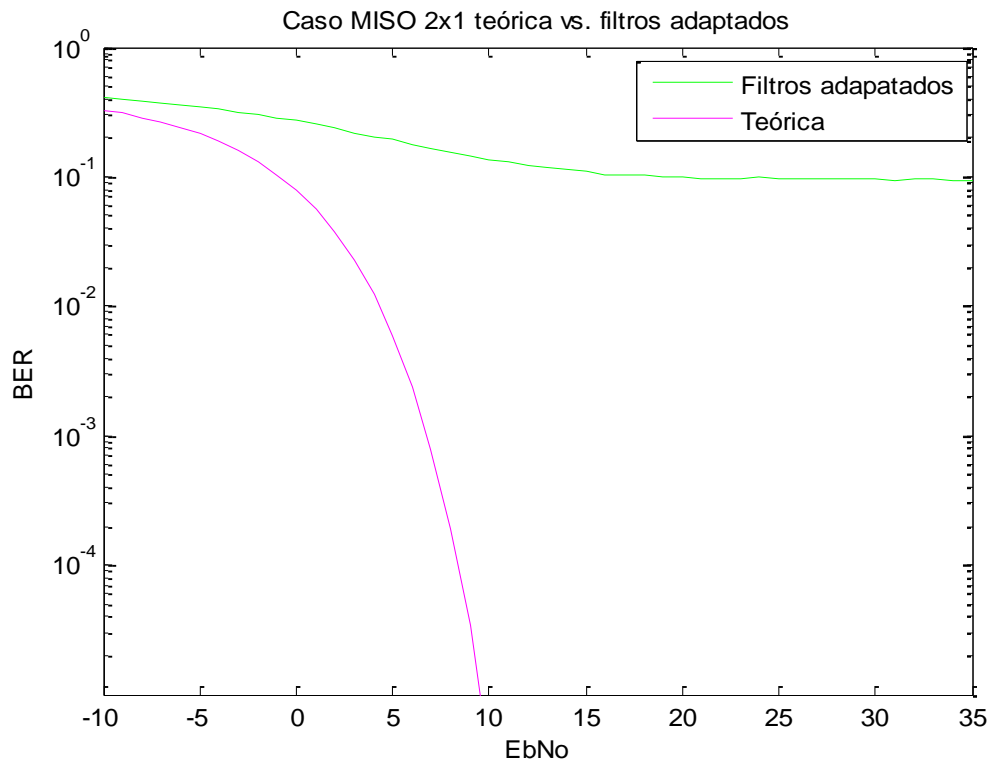
El receptor utilizado en las estaciones base será el mismo que el del caso anterior tanto para los filtros adaptados como para los detectores multiusuario. En este caso la detección multiusuario tomará un papel de incluso más relevancia que en el caso anterior ya que al añadir más antenas se añade más interferencia multiusuario.

Es importante resaltar que este modelo es MISO si se observa punto a punto y MIMO si se observa de manera global.

Una vez analizadas las mismas gráficas que en el caso anterior se pasará a analizar la mejora obtenida al añadir una antena a cada usuario.

4.2.1 Salida filtros adaptados

Las dos mismas curvas que en el caso SISO se mostrarán en este apartado:



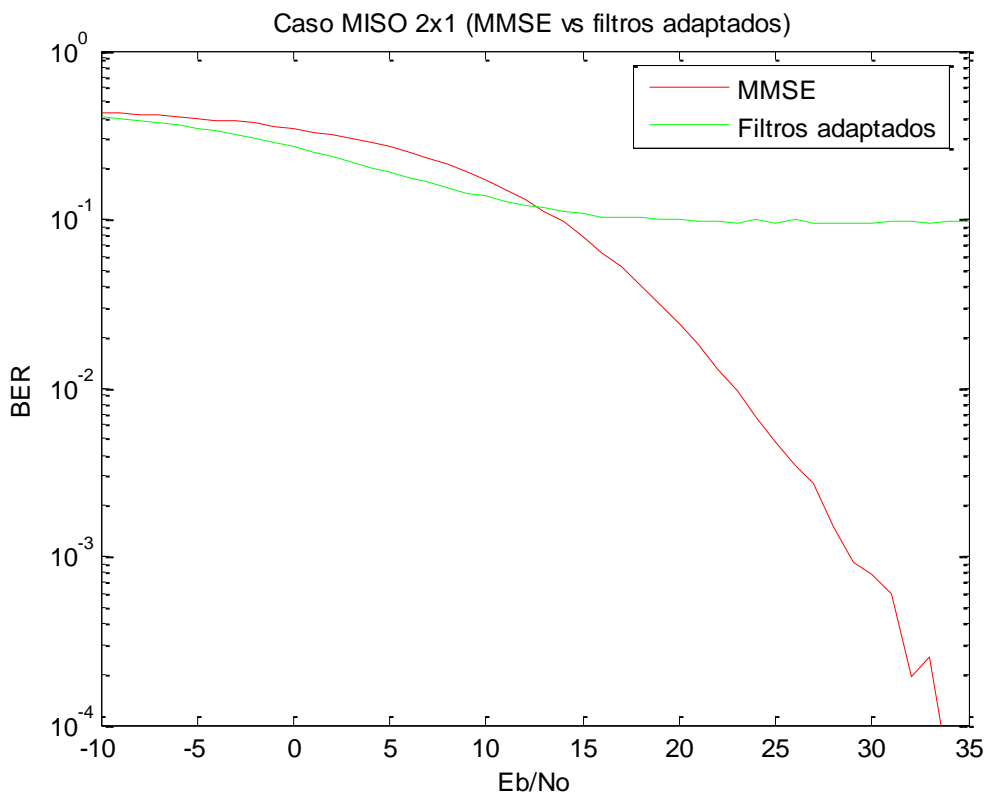
Gráfica 5. Salida filtros adaptados MISO 2x1 vs BPSK teórica sobre canal AWGN

Se puede observar que la curva de la BER de nuestro sistema se satura para una E_b/N_0 más baja que en el caso SISO y para una tasa de errores mayor. Esto es lógico y se debe al hecho de que al haber más antenas en transmisión la interferencia entre usuarios es mayor y como bien sabemos la interferencia multiusuario en detectores de filtros adaptados se considera como ruido por lo que el nivel de este aumenta más de lo que lo hace en el caso SISO.

De nuevo hemos querido mostrar la curva teórica de una BPSK punto a punto sobre una canal AWGN para poder tener una referencia.

4.2.2 Salida receptor MMSE

En esta sección demostraremos la mejora experimentada en el receptor al aplicar a la salida de los filtros adaptados un detector multiusuario de tipo MMSE:

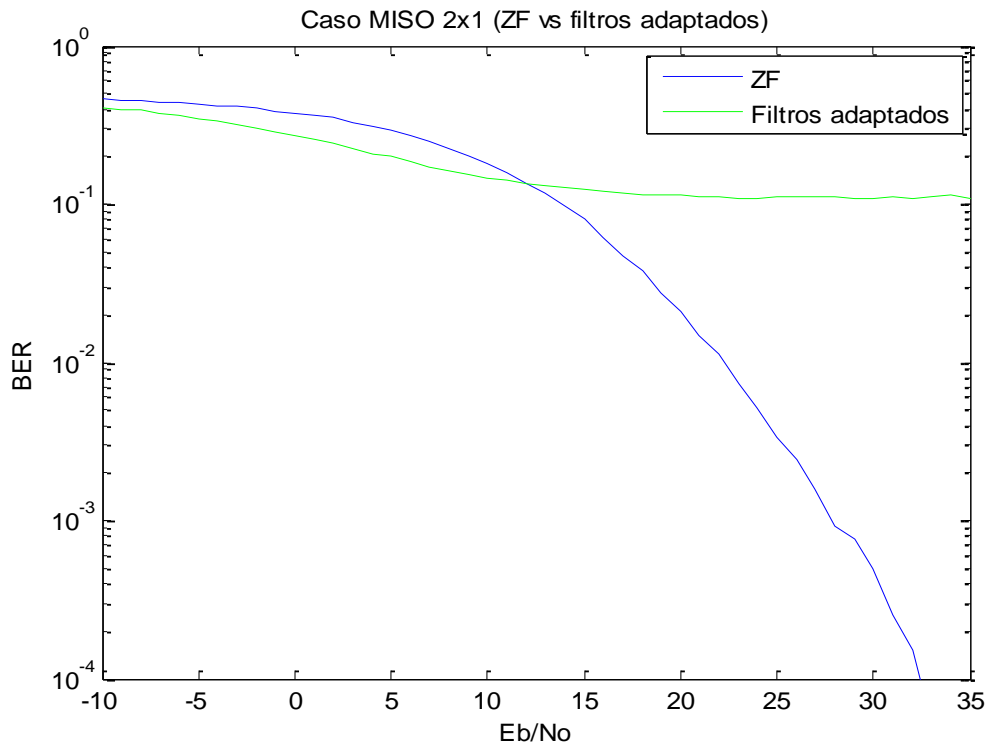


Gráfica 6. BER MMSE vs. Filtros adapt para caso MISO 2x1

Al haber dos antenas en cada usuario se hace más imprescindible si cabe la detección multiusuario. Este hecho se ve claramente al analizar la BER en un detector MMSE frente al de filtros adaptados. Análogamente al caso SISO para valores de E_b/N_0 bajos el detector de filtros adaptados rinde mejor por razones similares a las expuestas en dicho caso, sin embargo en el caso que nos concierne ahora la curva MMSE corta a la de los filtros adaptados para una E_b/N_0 más baja y a una tasa de errores mayor. Esto es debido a que en este caso, al haber mayor interferencia multiusuario la mejora experimentada de un detector a otro es mayor.

4.2.3 Salida receptor ZF

La BER en la salida de detector ZF va a ser estudiada en este punto observando, análogamente al apartado anterior, la mejora experimentada.

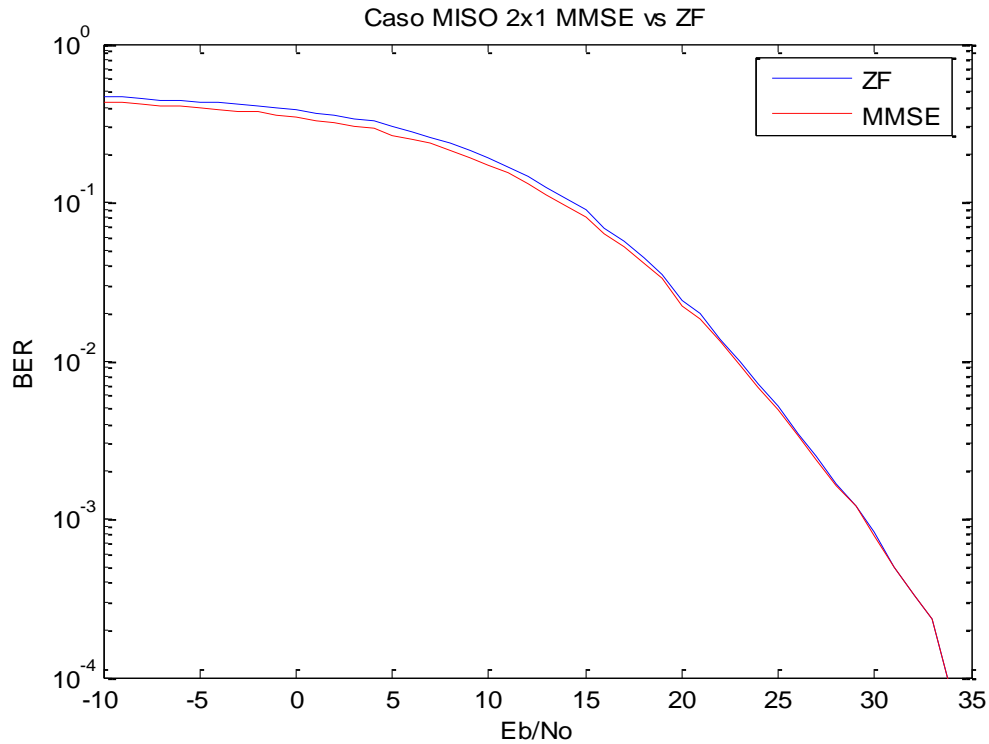


Gráfica 7. BER ZF vs filtros adaptados para caso MISO 2x1

Como con el detector MMSE la mejora respecto al detector de filtros adaptados es muy grande. Lo mismo también ocurre para valores bajos de E_b/N_0 y de nuevo el corte entre ambas curvas se produce para una E_b/N_0 menor que en el caso SISO.

4.2.4 MMSE vs. ZF

Ambos detectores multiusuario van a ser comparados ahora.

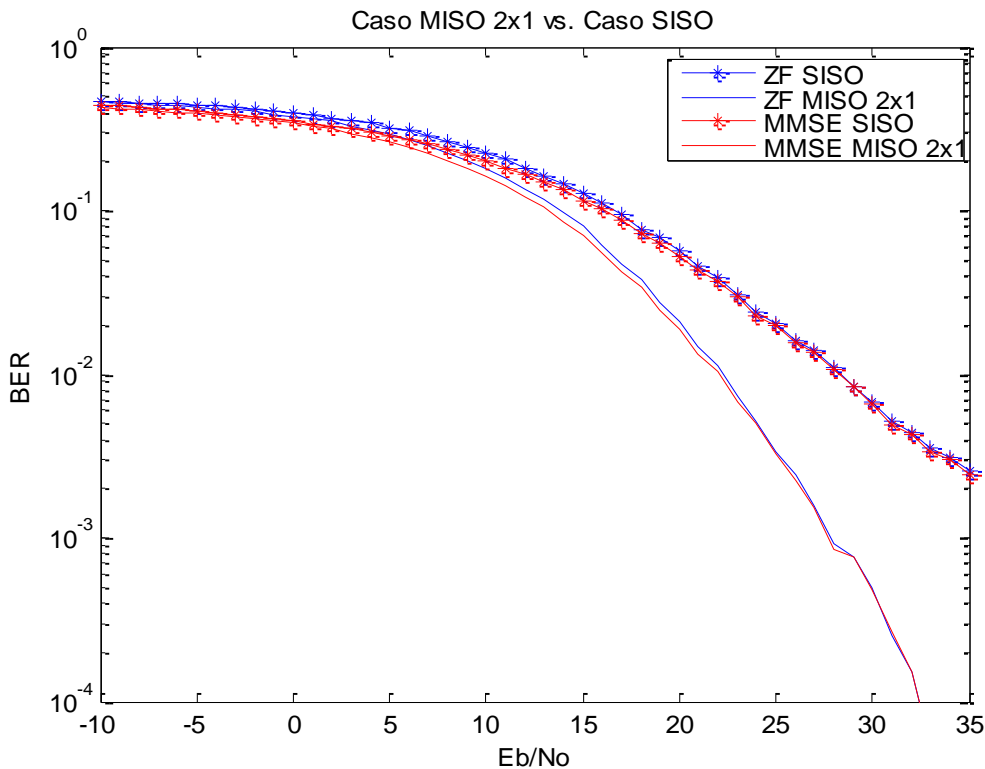


Gráfica 8. BER MMSE vs. ZF caso MISO 2x1

Se puede observar el mismo fenómeno experimentado en el caso anterior. El detector MMSE funciona mejor para valores de Eb/No bajos y tiende a igualarse con el detector ZF a medida que aumentan estos. Esto responde a la misma ecuación que en el caso anterior, la ecuación 21.

4.2.5 SISO vs. MISO 2x1

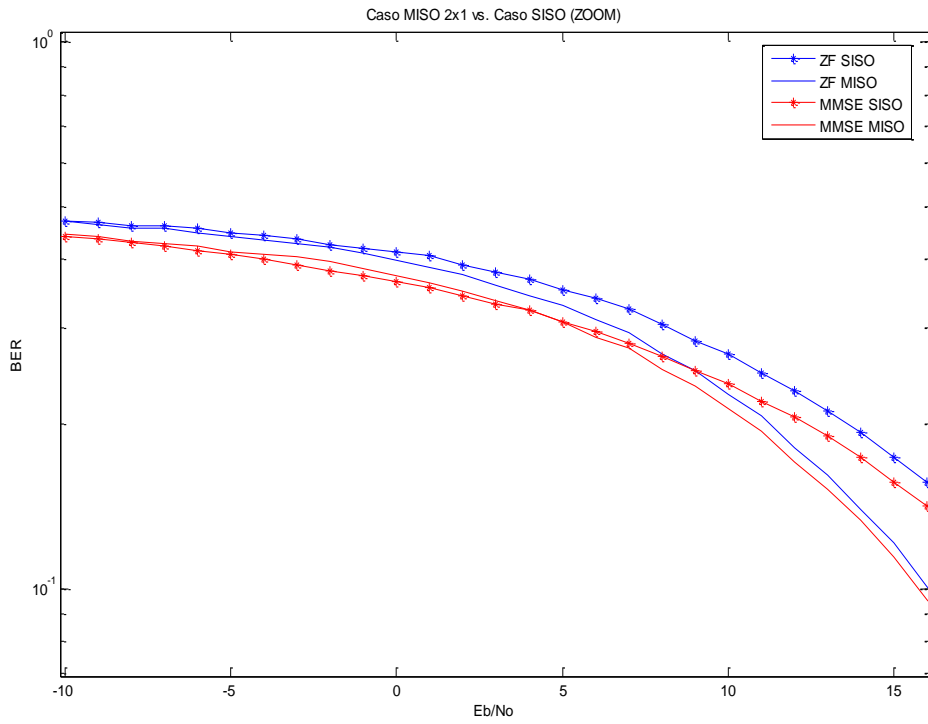
En este último apartado de este caso compararemos el funcionamiento de ambos detectores multiusuario para los dos casos ya estudiados apoyándonos en sus curvas BER.



Gráfica 9. MISO vs. SISO

Como se explicó en la parte teórica de la memoria, el hecho de disponer de dos antenas en transmisión y una en recepción hace que los bits transmitidos tomen dos posibles caminos o, lo que es lo mismo, que viajen por dos canales diferentes. La posibilidad de que ambos caminos sufran de un desvanecimiento severo es menor que la de que sólo sufra uno. Por esto, y como se puede apreciar en la gráfica 9, la curva de la BER del caso MISO mejora respecto de la del caso SISO.

También es importante apreciar que en ambos casos ocurre lo mismo en la comparación MMSE vs. ZF, MMSE rinde mejor para valores E_b/N_0 bajos y tiende a igualarse con el ZF según estos aumentan. Para apreciar esto último la gráfica 10 muestra un zoom ampliado de la gráfica 9.



Gráfica 10. Zoom de la gráfica 9

4.3 CASO MIMO 2x2

Como en los dos casos anteriores lo primero es, a través de una representación gráfica, tratar de explicar el caso al que nos encaramos.

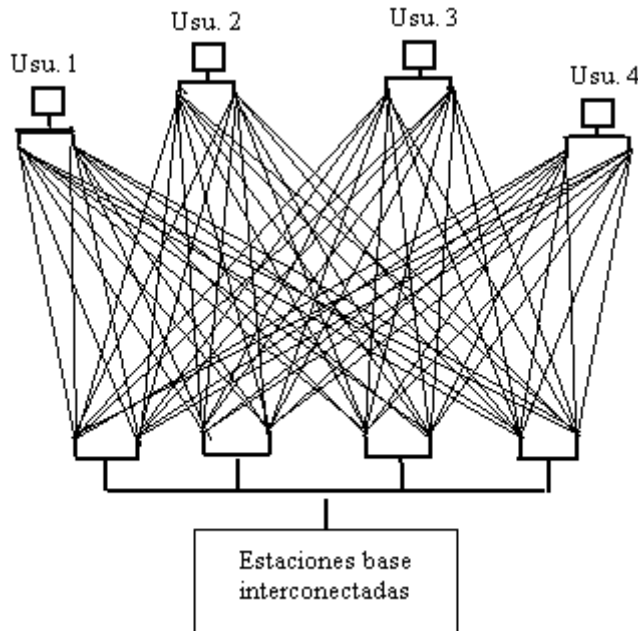


Figura 10. Modelo caso MIMO 2x2

Como se puede observar, en este caso disponemos de dos antenas en cada usuario y otras dos en cada estación base. De nuevo se necesitan ocho secuencias Gold para transmitir los ocho flujos de bits a través de un canal cuyas dimensiones doblan al caso SISO. El proceso de ensanchado y desensanchado es el mismo que en los dos casos anteriores y la modulación utilizada es de nuevo la BPSK.

Es importante reseñar que al transmitirse el doble de bits en el mismo tiempo la velocidad de transmisión va a aumentar. Para determinar el aumento de dicha velocidad respecto al caso SISO aplicaremos la siguiente fórmula para cada valor de SNR para el que realice la simulación:

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{S}{N} * \frac{1}{M}$$

Siendo M el número de antenas en cada estación base. A través de esta ecuación se podrá reflejar en la curva BER el aumento en la velocidad de transmisión.

El diagrama de bloques del transmisor va a mantenerse igual que en los dos casos anteriores mientras que el del receptor tendrá la siguiente forma.

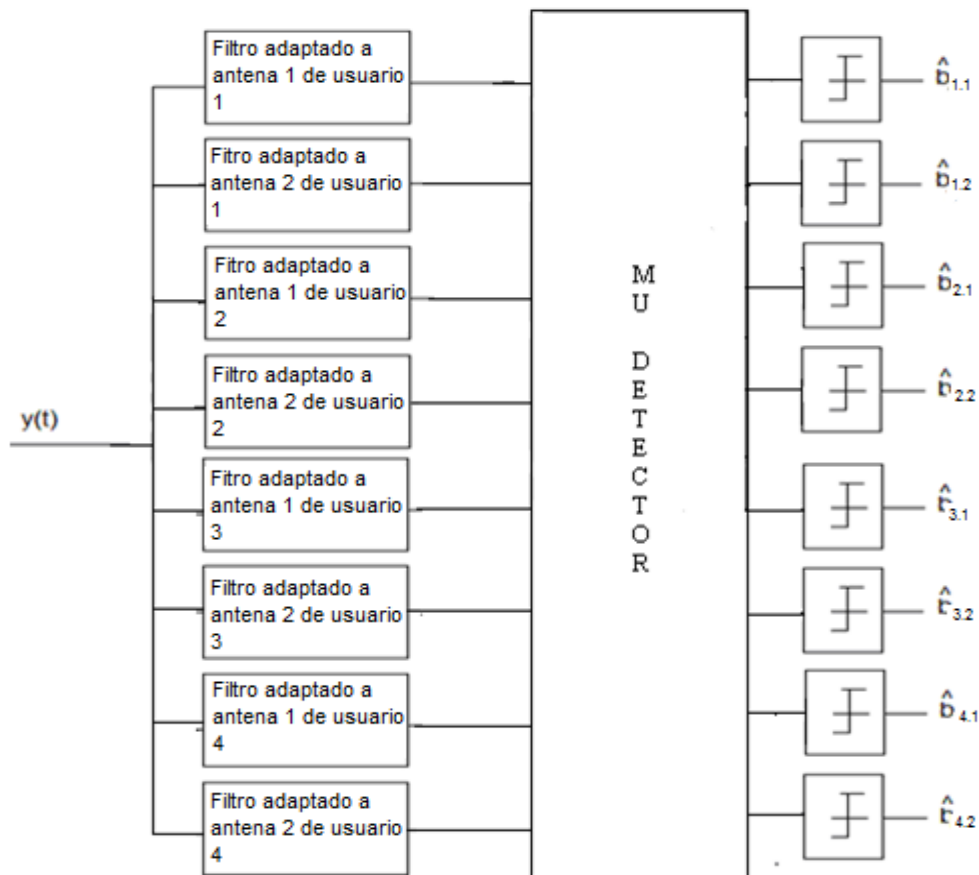
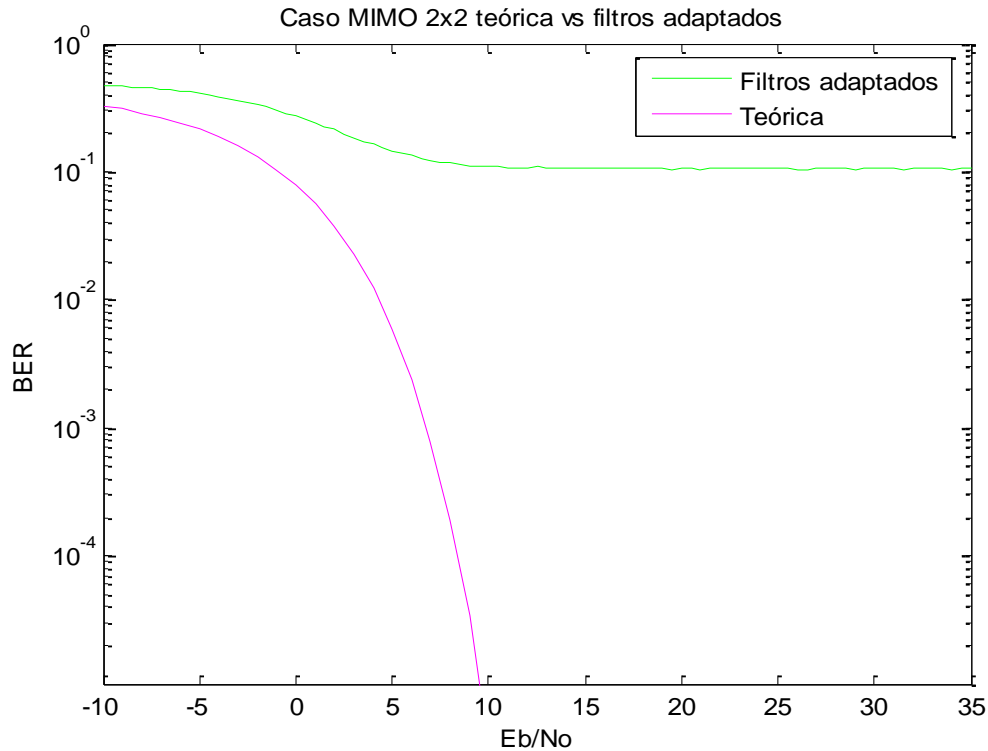


Figura 11. Diagrama de bloques detector caso MIMO 2x2

En este último caso, tanto en la comunicación punto a punto como en la comunicación global el modelo es MIMO.

4.3.1 Salida filtros adaptados

Como en los dos casos anteriores lo primero es analizar la salida del detector de filtros adaptados para hacernos una idea de la influencia de la interferencia multiusuario en el sistema.

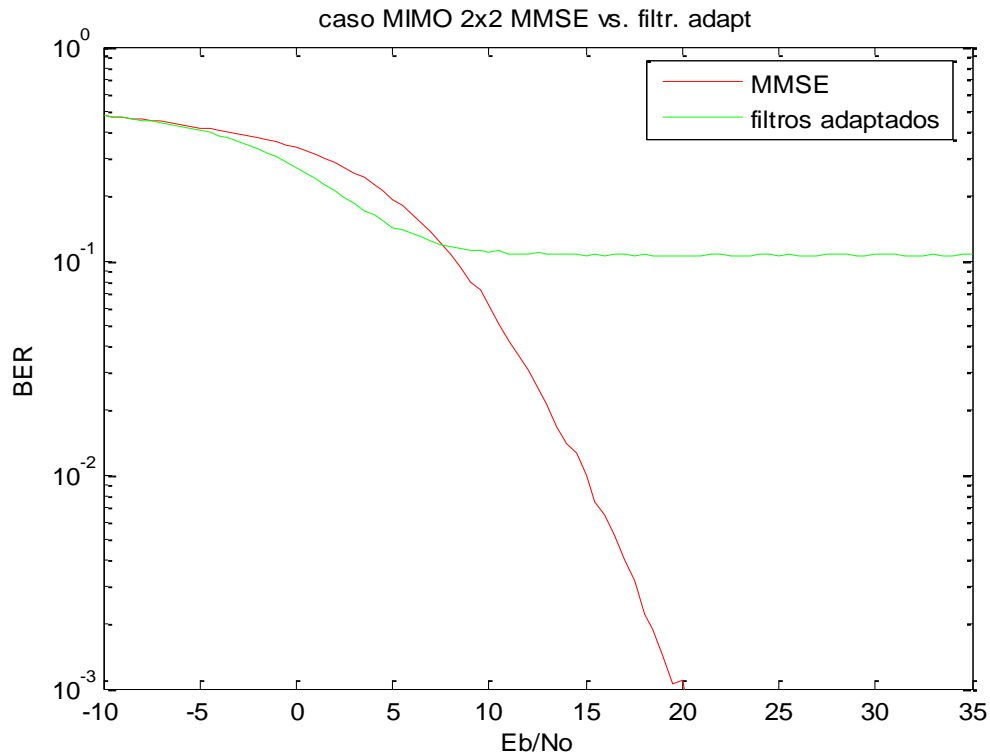


Gráfica 11. Salida filtros adaptados MISO 2x1 vs BPSK teórica sobre canal AWGN

Es importante destacar que antes del punto de saturación la pendiente de nuestra curva simulada y la de la teórica es bastante similar pero que este punto es a una E_b/N_0 menor que en los dos casos anteriores y para una tasa de error similar al caso MISO 2x1 y mayor que el caso SISO.

4.3.2 Salida receptor MMSE

De nuevo procederemos a analizar la mejora experimentada al añadir a la salida de los filtros adaptados un detector multiusuario de tipo MMSE.



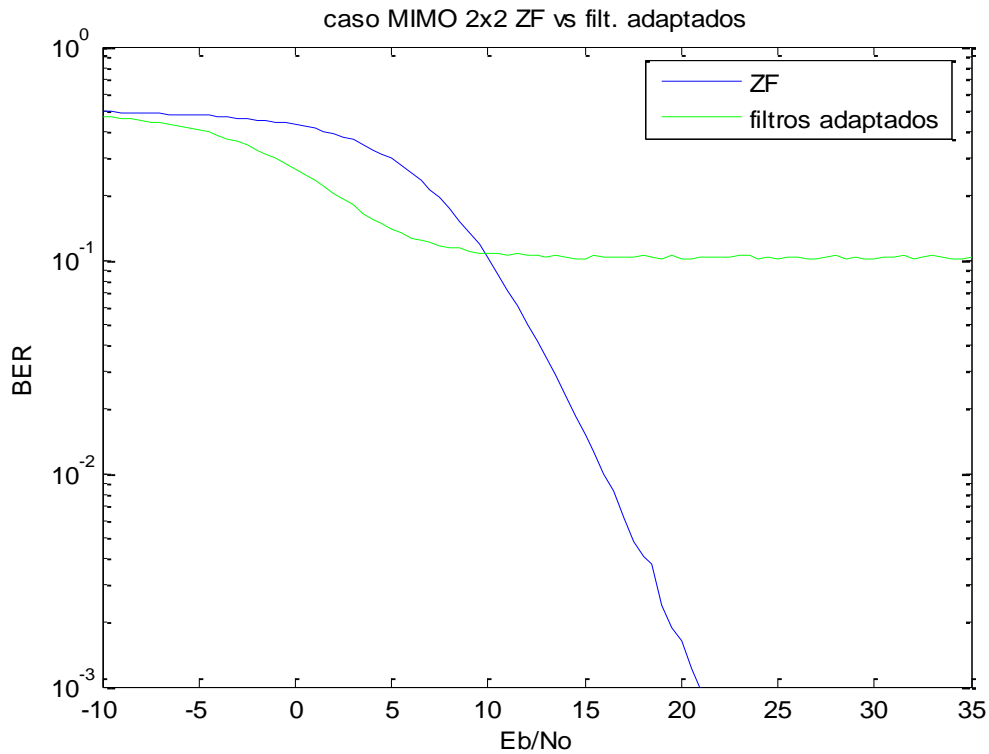
Gráfica 12. BER MMSE vs. filtros adaptados caso MIMO 2x2

Es fácilmente observable como somos capaces de reducir ampliamente la interferencia multiusuario utilizando un detector para este fin. También hay que señalar, como en los dos casos anteriores, que para valores de E_b/N_0 bajos el detector de filtros adaptados es más eficiente por lo explicado en el caso SISO.

También es posible observar que el corte entre ambas curvas se produce para un valor de E_b/N_0 menor que en los dos casos anteriores.

4.3.3 Salida receptor ZF

Análogamente a los dos casos anteriores la salida del detector multiusuario ZF va a ser comparada con la salida de los filtros adaptados.

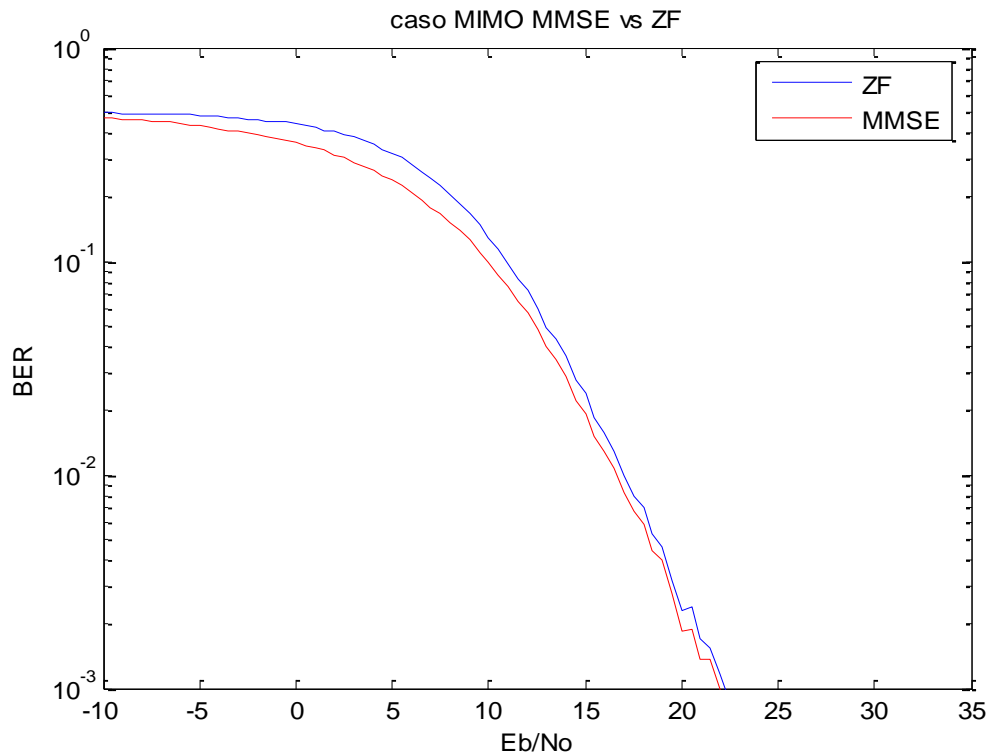


Gráfica 13. BER ZF vs. filtros adaptados caso MIMO 2x2

El resultado es el esperado, la BER a la salida de los filtros adaptados es menor para bajos valores de E_b/N_0 donde el ruido es mucho mayor que el término MAI. Sin embargo según este se va haciendo más pequeño entra en juego la interferencia multiusuario que es tomada como ruido por los filtros y eliminada por el detector ZF.

4.3.4 MMSE vs ZF caso MIMO 2x2

Ahora procedemos a la comparación de ambos detectores multiusuario.

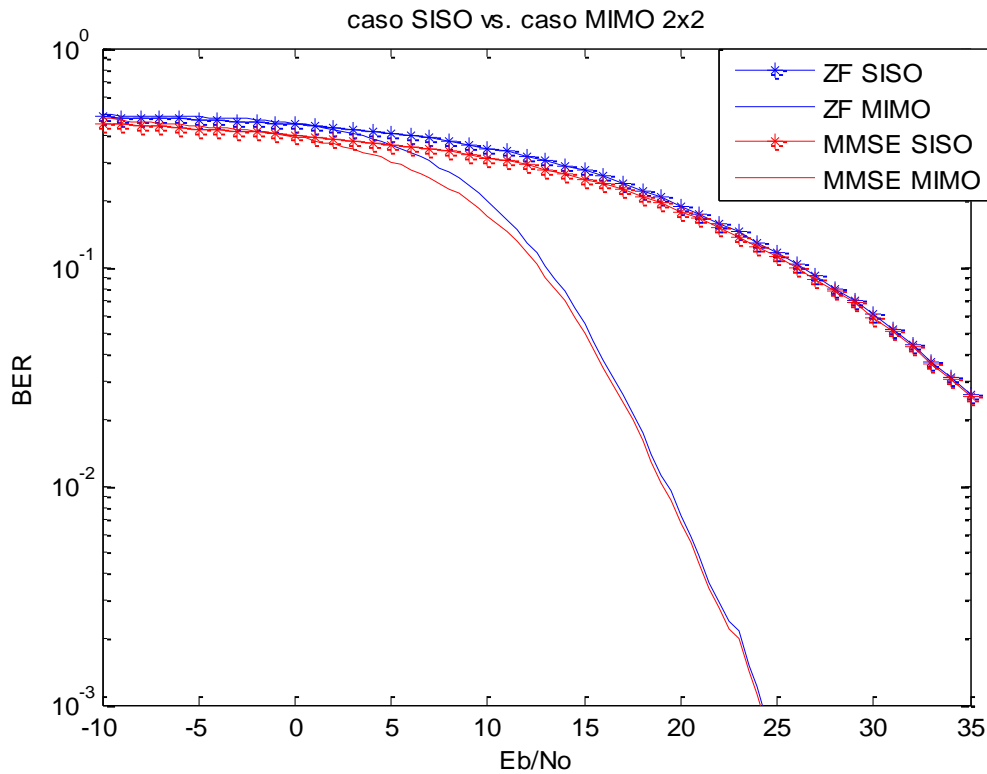


Gráfica 14. BER MMSE vs. ZF caso MIMO 2x2

De nuevo el detector MMSE nos ofrece mejores prestaciones que el ZF aunque estas tienden a igualarse según aumenta la E_b/N_0 .

4.3.5 MIMO vs SISO

Para finalizar con este caso vamos a compararlo con el caso SISO para analizar las mejoras experimentadas al incorporar más antenas al escenario:



Gráfica 15. MIMO vs. SISO

Debido a que en este caso se disponen de dos antenas por usuario y otras dos por estación base la velocidad de transmisión aumenta. Al observar las curvas BER respecto a E_b/N_0 y no respecto a SNR es posible apreciar el aumento en dicha velocidad comparando las curvas de ambos casos.

5. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

Dos eran los objetivos principales de este proyecto, por un lado analizar las mejoras que se obtienen al incorporar a una red celular tecnología MIMO y por otro estudiar las diferentes maneras de atacar la interferencia multiusuario.

Ha quedado constatado a lo largo del proyecto que ambos objetivos han ido de la mano ya que eliminar la interferencia multiusuario es básico si se quiere implementar un sistema MIMO en una red de celdas y aprovechar las ventajas que esto aporta.

En los tres casos analizados (SISO, MISO y MIMO) se han ido mostrando las diferentes curvas BER para las salidas de nuestro sistema observando las mejoras obtenidas. Si comparamos la salida de los filtros adaptados para los tres casos podemos observar que la tasa de error a la que saturan aumenta progresivamente del primer al tercer caso, sin embargo para valores pequeños de E_b/N_0 la caída en el curva es más rápida en el tercer caso y progresivamente más lenta hasta el primero antes del punto de saturación. Esto hace que la curva en el tercer caso se sature para un valor de E_b/N_0 menor que en los otros dos casos.

Respecto a la salida de los detectores multiusuario, comparando las salidas ZF y MMSE de los tres casos podemos ver que aumentando el número de antenas en el sistema se disminuye agresivamente la tasa de errores en la comunicación entre los usuarios móviles y las estaciones base.

Ahora comparando más detalladamente los casos MISO Y MIMO en los que se introduce una antena en el receptor, y una antena en transmisor y el receptor respectivamente, nos damos cuenta que el segundo ofrece bastante mejores prestaciones que el primero. Este hecho se da porque al tener dos antenas tanto en el transmisor como en el receptor en el caso MIMO el caudal es doble y existen más caminos entre transmisor y receptor.

Las líneas futuras a seguir quedan claramente delimitadas ya que no serían otras que seguir profundizando en los sistemas MIMO añadiendo antenas tanto a los usuarios móviles como a las estaciones base. De esta manera tendríamos que afrontar nuevos y difíciles retos para atajar las crecientes interferencias multiusuario utilizando las técnicas desarrolladas en este proyecto y otras más complicadas como las no lineales o los adaptativos.

Otro aspecto donde se podría avanzar es en el cálculo de la pseudoinversa de la matriz de correlación entre usuarios ($\bar{\bar{R}}^{-1}$), investigando

algoritmos más eficientes de cálculo que aceleren la ejecución del código en Matlab.

6. PRESUPUESTO DEL PROYECTO

En este proyecto se van a tratar de analizar los recursos tanto humanos como computacionales utilizados y tratar de cuantificarlos económicamente. Los recursos humanos serán analizados desde el punto de vista de horas trabajadas tanto como por el alumno como por el tutor traduciendo cada hora en un valor económico determinado. En cuanto, a los recursos computacionales los tiempos de ejecución para los diferentes casos serán analizados.

6.1 Recursos humanos

Este ha sido el recurso más utilizado para la realización del proyecto y se ha traducido en horas de dedicación al mismo. Es importante resaltar que la dedicación al proyecto fue total en los cuatro primeros meses, viéndose esta reducida a sólo un día a la semana en los tres siguientes por mi incorporación a la vida laboral.

Por tanto, el tiempo estimado de realización del proyecto ha sido de 7 meses con una media de trabajo de 6 horas diarias los cuatro primeros meses y de 6 horas semanales los 3 siguientes.

Al ser el estudiante no licenciado se puede aproximar un sueldo de 400 euros al mes mientras que cada hora dedicada por el tutor al proyecto tendría un coste de 15 euros (1 hora cada 10 días). La tabla refleja la dedicación tanto en horas como en el valor económico de estas.

	Horas	Euros/hora	Euros
Alumnos	432	6,06	2618
Tutor	21	15	315
Total	453		2933

6.2 Recursos computacionales

Uno de los factores que más está relacionado con la duración del proyecto es el tiempo de ejecución de los diferentes códigos implementados en Matlab. Este tiempo es mayor cuanto más complejo es el caso así la ejecución más rápida se da para el caso SISO siendo cada vez más lenta para los dos siguientes casos.

Se va a reflejar en la siguiente tabla el tiempo medio de ejecución de cada caso.

Caso	Tiempo medio de ejecución
Caso SISO	35 minutos
Caso MISO 2x1	1 hora y 30 minutos
Caso MIMO 2x2	2 horas y 15 minutos

Se puede observar que el tiempo de ejecución del caso SISO es bastante menor que el de los otros dos, esto se debe principalmente a que los casos MISO2x1 y MIMO2x2 se comparan frente al caso SISO, cosa que no pasa en el caso SISO. Además las matrices de canal son más complicadas en los dos últimos casos.

Respecto a la diferencia de tiempos de ejecución del caso MIMO2x2 frente al MISO2x1, el primero es más lento porque consta de dos antenas en transmisión en vez de una por lo que el cálculo de la señal recibida es más complicado.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Rahnema M., " *Overview of the GSM system*" IEEE Communications Magazine 2003
- [2] A.C. McCormick, E.A. Al-Susa, " *Multicarrier CDMA for future generation mobile communication*" Electronics & Communication Engineering Journal 2002
- [3] White paper, IEEE 802.16 and WiMAX " *Broadband Wireless Access for Everyone*", 2006
- [4] Mollah, Bager M., " *Comparative analysis of Gold Codes with PN codes using correlation property in CDMA technology*" Computer communication and informatics international conference, 2012
- [5] Tao Wang, " *Analyzing the interference power of narrowband jamming signal on UWB system*" Personal, Indoor an Mobile Radio Communication Conference, 2003
- [6] Shrikant, Honade J. And Ingole P.V., " *Removal of Multiple Access Interference in DS-CDMA System*" International Journal of Scientific and Research Publications, 2012
- [7] UC3M, " *Tema 3: Modelos de propagación de gran escala*" Sistemas y Canales de Transmisión, 2011
- [8] Gesbert D., Kountouris M., Salzer T. " *From single user to multiuser communications: Shifting the MIMO Paradigm*" IEEE Signal Processing Magazine, Sept 2007
- [9] Verdu S. " *Multiuser Detection*" Cambridge University Press, 1998

