

## **CAPITULO 4 : SIMULACIONES**

### **4.1 Introducción**

En este capítulo se mostrarán todas las simulaciones que se han realizado del sistema OFDM con técnicas CDMA. Para realizar estas simulaciones se ha empleado el programa matemático MATLAB 7.0 sobre el cual se han aplicado los algoritmos diseñados que permiten la visualización de las gráficas pertinentes.

El análisis que se ha realizado consiste en representar la tasa de error de bit frente a la energía por símbolo transmitido. Esta relación mostrará la fiabilidad del sistema en diferentes circunstancias.

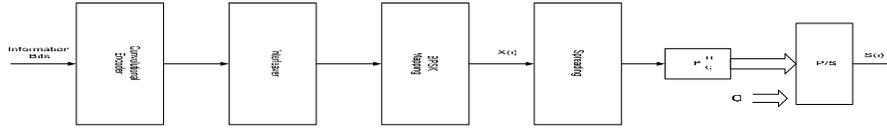
Estas circunstancias vendrán definidas por la variación de ciertos parámetros en las simulaciones ya que se variará el modelo del canal por donde se transmite, el número de símbolos transmitidos, el código a utilizar así como el número de bloques de símbolos a transmitir simultáneamente en CDMA, el tipo de receptor utilizado y el número de usuarios que utilizan el sistema. Para las simulaciones se usarán 64 portadoras y la longitud de los ceros insertados será de 16. Además el rango de representación de la relación  $E_b/N_0$  variará desde el valor 0 hasta el 18 o hasta el 40 dependiendo del caso.

Es destacable comentar que con objeto de lograr las simulaciones más precisas posibles no se ha limitado realizar una simulación por ensayo sino que el resultado final presentado es el promediado de cien ensayos diferentes con las mismas características de simulación. Cada uno de ese conjunto de cien ensayos se ha realizado para diez canales diferentes por lo que el resultado final será el promedio de mil simulaciones.

Se empezará por simular sin sistema OFDM sin incluir técnicas de CDMA para varios canales. Posteriormente se simula el sistema incluyendo técnicas de CDMA y por lo tanto estudiando algunas de las infinitas posibilidades que la variación de los parámetros permite que como se comprobará posteriormente serán los códigos a utilizar, en número de usuarios en el sistema, el tipo de receptor, etc

## 4.2 Análisis del sistema diseñado

El sistema realizado no es más que la combinación de los bloques de la Figura 1.1 que se vuelve a representar a continuación:



**Figura 1.1:** Modelo del sistema ZP-CDMA/OFDM

Cada uno de los bloques anteriores (excepto los tres primeros) se implementa mediante una matriz. Así al bloque denominado ‘Spreading’ le corresponde la matriz  $C$ , al ‘ $F_M^H$ ’ la matriz del mismo nombre  $F_M^H$  y por último los ceros insertados se representan por la matriz  $T$  (NOTA: en la figura se ha representado un sistema ZP-OFDM-CDMA, debido que a casi todas las simulaciones se realizan utilizando este sistema. Si se hubiera representado el CP-OFDM-CDMA aquí existiría una diferencia, ya que el prefijo cíclico no consiste en añadir ceros sino que al símbolo OFDM se le añade al principio una copia de la última parte del mismo y como se comentará a posteriori la matriz  $T$  variará).

También se modela el canal mediante la matriz  $H$ , que tendrá formas diferentes en función del sistema (ZP ó CP), de forma que la señal que viaja por el canal responde a la ecuación 4.1:

$$S = H T F_M^H C X \quad (4.1)$$

Tras haber viajado por el canal a la señal original se le añade ruido con lo que la señal recibida viene dada por la ecuación 4.2:

$$R = H T F_M^H C X + N \quad (4.2)$$

Si se denomina como  $A$  al producto  $H T F_M^H$  y  $U$  a  $CX$ , podemos reescribir la ecuación 4.2:

$$R = A U + N \quad (4.3)$$

Una vez que el símbolo OFDM alcanza el receptor, es hora de demodular. Como regla general al recuperar la información original se aplica la ecuación 4.4:

$$\hat{X} = G R \quad (4.4)$$

Comparando la X transmitida con la  $\hat{X}$  estimada en recepción, obtendremos la tasa de error de bit, BER, que será el parámetro a representar en las simulaciones.

Teniendo en cuenta que es general se usa M subportadoras, que la longitud del Zero Padding ( o la del CP) es de L muestras por lo que la longitud del símbolo extendido que viajará por el canal será M+L pasaremos a describir brevemente las matrices y sus dimensiones:

- H: es la matriz del canal. Su composición variará en función de que el sistema sea CP-OFDM o ZP-OFDM. En ambos casos sus dimensiones son  $(L+M) \times (L+M)$
- T: es la matriz de transmisión, que igualmente variará en función del sistema a realizar. Igualmente presentan las mismas dimensiones  $(P \times M)$
- $F_M^H$  es la matriz FFT de M muestras. El superíndice H implica compleja-conjugada por lo que realmente se trata de una matriz IFFT y es cuadrada de tamaño M.
- C es la matriz de código que también presentará forma diferente según el número de símbolos a transmitir simultáneamente. En el caso de que sólo se transmita uno sus dimensiones serán  $(M \times 1)$ , en el caso de transmitamos J símbolos simultáneamente el tamaño de la matriz será  $(M \times J)$
- G: es la matriz de recepción. Su forma cambia en función del receptor a diseñar.

A continuación se describirá brevemente el proceso de diseño de cada uno de los receptores.

#### 4.2.1 Receptor Zero Forcing (ZF)

En este caso la matriz G viene definida por:

$$G_{ZF} = F^H (H^*)^{\dagger} \quad (4.5)$$

donde la matriz  $H^*$  es el producto R H T. La matriz H y T son las anteriormente descritas, por el contrario la matriz R se encarga de eliminar el CP en el caso de CP-OFDM-CDMA y es la matriz identidad para sistemas ZP. El superíndice  $\dagger$  significa pseudoinversa. Si analizamos la demodulación ZF para ZP vemos que no es más que multiplica la señal recibida por las inversas de las matrices por las que se multiplicó en el transmisor, obteniendo así la señal original, salvo los errores introducidos por el ruido.

$$\hat{U} = G_{ZF} R = F^H (IHT)^+ R = F^H (IHT)^+ HTF_M^H CX = \underbrace{F^H T^{-1} H^{-1} HTF_M^H}_I CX = CX \quad (4.6)$$

Ya sólo resta multiplicar por la matriz de código traspuesta:

$$\hat{X} = \underbrace{C^T CX}_I \approx X \quad (4.7)$$

#### 4.2.2 Receptor Máxima Verosimilitud (MMSE)

Para un sistema dado por la ecuación 4.3, el receptor  $G_{MMSE}$  viene dado por la ecuación (4.8)

$$G_{MMSE} = R_{uu}^{-1} A^T R_{rr}^{-1} \quad (4.8)$$

donde las matrices  $R_{uu}$  y  $R_{rr}$  son las matrices de autocorrelación de las señales U y R respectivamente aunque se debe comentar que en el caso de  $R_{uu}$ , el resultado será el de una constante, que no influye, multiplicando una matriz identidad, por lo que aproximaremos  $R_{uu}$  por la matriz identidad y que  $R_{rr}$  será más precisa cuanto más muestras tome, es decir, cuanto más símbolos se transmitan.

Así pues la señal estimada será:

$$\hat{U} = G_{MMSE} R \quad (4.9)$$

y por último sólo debemos multiplicar por la matriz de código traspuesta para obtener una estimación del símbolo transmitido:

$$\hat{X} = C^T \hat{U} \quad (4.10)$$

#### 4.2.3 Receptor MMSE-FAST

El punto de partida es de nuevo la ecuación 4.3. Dada una R definida de esa forma, le calcularemos la transformada de Fourier de  $P=M+L$  puntos, multiplicándola por una matriz F de dimensión P, tal y como se puede observar en la ecuación 4.11:

$$y = F_p R + N \quad (4.11)$$

donde N no es más que el término de ruido introducido por el canal.

Si sustituimos valores en la ecuación 4.11 e introducimos el producto  $F_p^H F_p$ , que resulta la matriz identidad, por lo que es un proceso totalmente lícito, se llega a:

$$y = \underbrace{F_p H F_p^H}_{\Lambda_p} \underbrace{F_p T F_M^H}_{V} \underbrace{C X}_{U} + N = \Lambda_p \underbrace{V U}_{\hat{S}} + N = \Lambda_p \hat{S} + N \quad (4.12)$$

donde  $\Lambda_p$  es una matriz diagonal. Será a este sistema al que le calculemos el recepto  $G_{MMSE}$ , es decir:

$$G_{MMSE} = R_{\hat{S}\hat{S}} \Lambda_p^{-1} R_{yy}^{-1} \quad (4.13)$$

Por lo que el sistema de demodulación vendrá determinado por:

$$\hat{S} = G_{MMSE} y \Rightarrow \hat{U} = V^{-1} \hat{S} \Rightarrow \hat{X} = C' \hat{U} = C' V^{-1} \hat{S} = C' V^{-1} G_{MMSE} y \quad (4.14)$$

#### 4.2.4 Receptor Overlap and Add (OLA)

La base del receptor OLA está en intentar ‘convertir’ la señal ZP-OFDM-CDMA en una señal de características CP-OFDM-CDMA y a partir de ese momento demodular la señal como si realmente fuera CP. Para ello a las L primeras filas de la matriz H del sistema ZP le sumamos las últimas originando la matriz  $\hat{H}$ , que será de dimensiones MxM. Así pues queda esta nueva ecuación:

$$R = \hat{H} \hat{X} + \hat{N} \quad (4.15)$$

donde  $\hat{X} = F_M^H C X$ .

Tras haber hecho la conversión aplicamos, como en el caso anterior, al vector la Transformada de Fourier, multiplicando por la matriz FFT  $F_M$ :

$$y = F_M R = F_M \hat{H} \hat{X} = \underbrace{F_M \hat{H} F_M^H}_{\Lambda} \underbrace{C X}_{U} = \Lambda U \quad (4.16)$$

Se repite el proceso del receptor FAST, es decir, será ahora a este sistema al que se le aplique el receptor  $G_{MMSE}$ :

$$G_{MMSE} = R_{uu} \Lambda^{-1} R_{yy}^{-1} \quad (4.17)$$

En este caso el cálculo de la matriz  $R_{yy}^{-1}$ , que es diagonal, presenta ciertas peculiaridades. Para calcular la inversa de matriz, se toman los elementos de  $R_{yy}$ , que también es diagonal, se calculan los inversos de dichos elementos, que serán los elementos diagonales de la matriz  $R_{yy}^{-1}$ . Por último el proceso de demodulación es el mismo que el aplicado anteriormente, es decir:

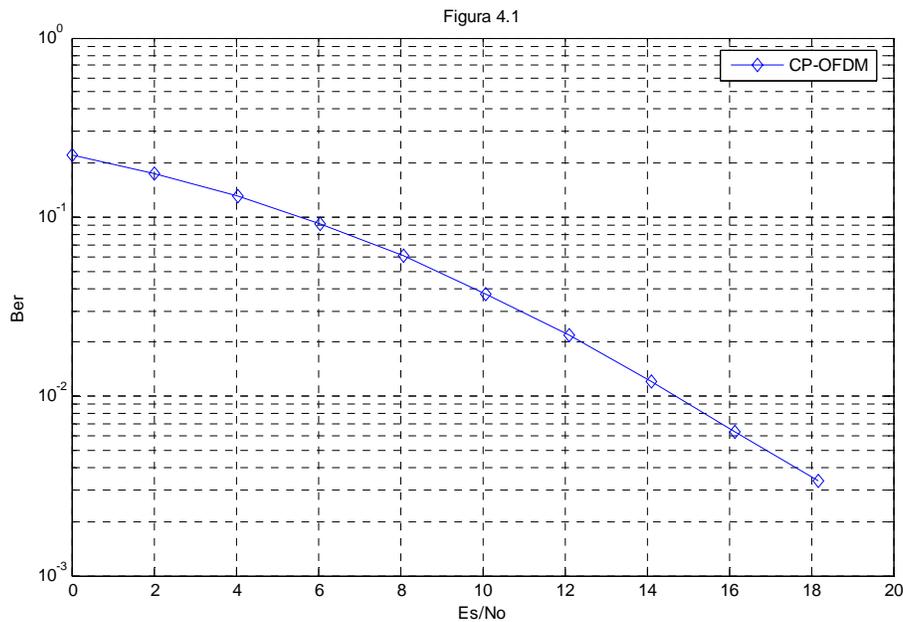
$$\hat{U} = G_{MMSE} y \Rightarrow \hat{X} = C' \hat{U} = C' C X \approx X \quad (4.18)$$

### **4.3 Simulación de un sistema OFDM**

Tal y como se comentó en los capítulos anteriores, existen diferencias entre sistemas que usan como bits de guarda un prefijo cíclico (CP-OFDM) y aquellos que utilizan “Zero Padding”(ZP-OFDM). Se realizará pues un estudio particular de cada uno de ellos para posteriormente ver un análisis comparativo.

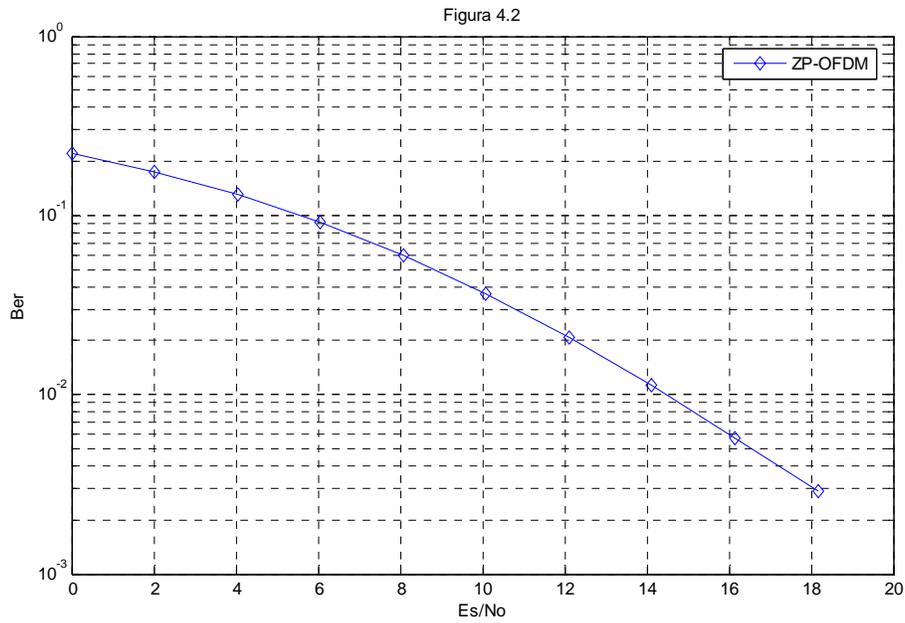
Comenzaremos con una simulación de un sistema CP-OFDM en el que tal y como comentamos anteriormente se utilizarán diez canales escogidos del modelo de canal Hiperlan/2 tipo A. El resultado se puede ver en la figura 4.1

En la siguiente simulación, en la Figura 4.2 se establece la misma comparativa con los mismos canales utilizados pero en este caso se estudia el sistema ZP\_OFDM.

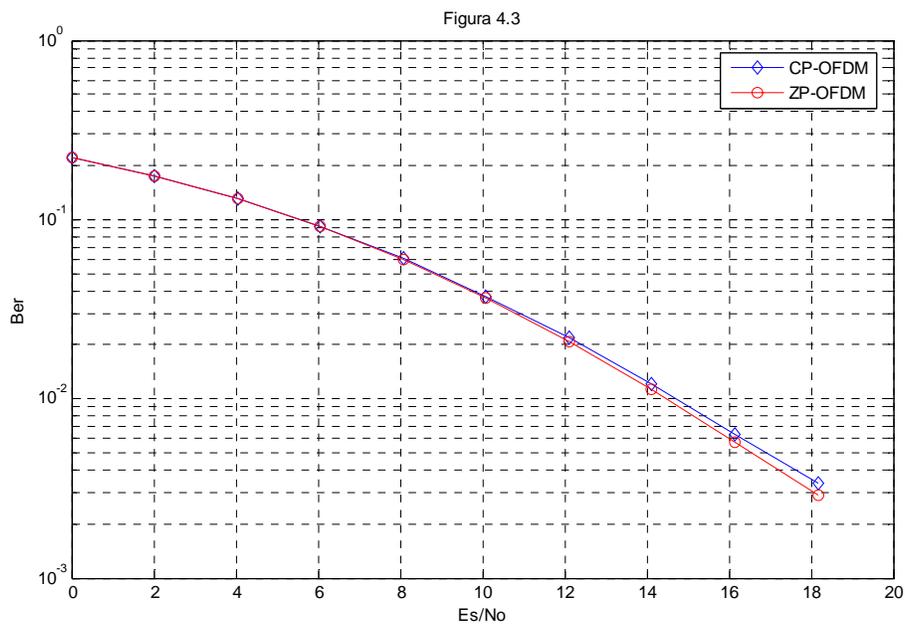


**Figura 4.1:** CP-OFDM

Por último, se realizará un estudio en el que fijando el número de símbolos a transmitir a 1000 y estableciendo el mismo modelo de canal (Hiperlan/2 tipo A) para los diez promedios y la misma velocidad de los transmisores ( $v = 0\text{m/s}$ ) se pueden comprobar las diferencias entre ambos sistemas (ZP-OFDM y CP-OFDM). El resultado se muestra en la figura 4.3.



**Figura 4.2: ZP-OFDM**



**Figura 4.3: CP-OFDM frente a ZP-OFDM**

Como observamos en la anterior figura las prestaciones del sistema ZP-OFDM mejoran levemente las del CP-OFDM.

#### **4.4 Simulación de un sistema OFDM utilizando tecnología CDMA**

Como ya se adelantó en capítulos anteriores el uso de CDMA en sistemas OFDM consiste en el empleo de una codificación previa a la transmisión del símbolo para aumentar el espectro del mismo y mejorar las prestaciones en cuanto a las interferencias entre canales e intersimbólicas.

Para estas simulaciones se variarán parámetros diferentes a los que se utilizaron en la simulación de un sistema OFDM. Así en este tipo de sistemas podrán modificarse aspectos como:

- El código utilizado : principalmente se trabajará con códigos aleatorios y Hadamard
- Número de símbolos transmitidos simultáneamente : variará desde el caso más sencillo de enviar un símbolo ( en cuyo caso se envían M chips para el único símbolo transmitido , siendo M el número de subportadoras a transmitir) a casos más complejos en los cuales se envían J símbolos simultáneamente ( es decir , para cada símbolo transmitido se utilizan M/J chips ya que se envían J símbolos )
- El tipo de receptor que se utilizará. En el análisis de este sistema se utilizarán cuatro receptores diferentes :
  - Receptor “Zero-Forcing” (ZF)
  - Receptor de “Máxima Verosimilitud” (GMMSE)
  - Receptor GMMSE-FAST
  - Receptor “Overlapp and add” (OLA).

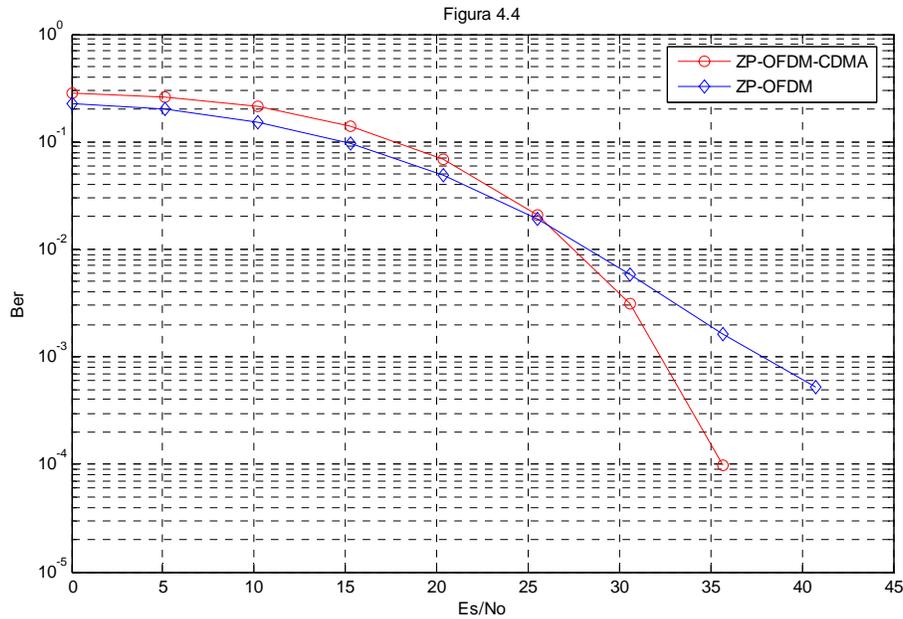
Se realizarán comparativas entre los cuatro tipos de receptores.

- El número de usuarios que utilizan el sistema simultáneamente: de nuevo partiremos del caso más sencillo de un solo usuario e iremos aumentando el número para finalizar con una comparativa.

Por último comentar que el análisis se dividirá en función de este último parámetro, es decir se comienza con un estudio para el caso de un usuario y se aumenta en simulaciones posteriores.

##### **4.4.1 OFDM Vs OFDM-CDMA**

En primer lugar se representa una comparativa entre ambos sistemas trabajando bajo las mismas circunstancias, que serán: empleo de ZP, mil símbolos transmitidos, receptor ZF y el empleo del mismo modelo de canal y de de velocidad de los transmisores. Se utilizarán códigos aleatorios y se transmite un solo símbolo a la vez .El resultado se muestra en la Figura 4.4



**Figura 4.4:** OFDM Vs OFDM-CDMA

#### **4.4.2 OFDM-CDMA con un usuario**

Tal y como se indica en el título en este conjunto de simulaciones se establece la presencia de un solo usuario. Para simplificar las simulaciones, se considerará el uso de los siguientes parámetros: modelos de canal Hiperlan/2 clase A, una velocidad del transmisor de 0 m/s y mil símbolos transmitidos por simulación. En este caso, como ya se comentó en la introducción del capítulo, la precisión del receptor MMSE depende directamente de los símbolos transmitidos, de forma que se ha cambiado el bucle, es decir se mantienen los diez canales diferentes, sin embargo se transmiten 2500 símbolos en lugar de 1000 y para no ralentizar en demasía la ejecución de las simulaciones, los símbolos se transmiten 60 en lugar de las 100 veces anteriores.

En la figura 4.5 se representa la primera de estas simulaciones en las que se estudia la respuesta de los cuatro receptores anteriormente descritos en un sistema en el que se sólo transmite un símbolo simultáneamente ( $J=1$ ) y se usa un código aleatorio.

La siguiente simulación (Figura 4.6) corresponde al mismo caso anterior utilizando códigos Hadamard. Esto nos permite comparar el comportamiento de cada receptor cuando en el transmisor se utiliza otro tipo de código diferente al aleatorio.

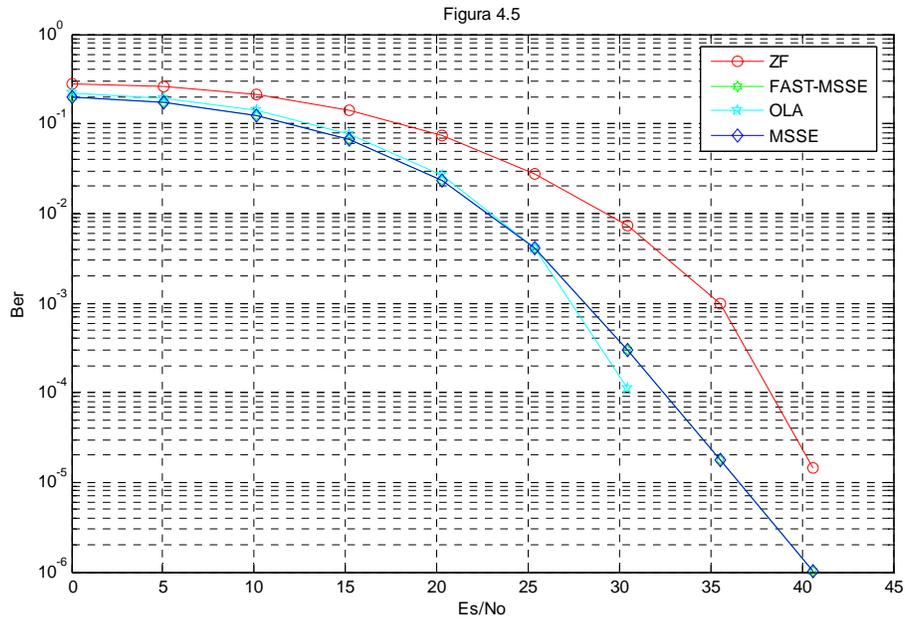


Figura 4.5: ZP-OFDM: J=1 ; Código aleatorio

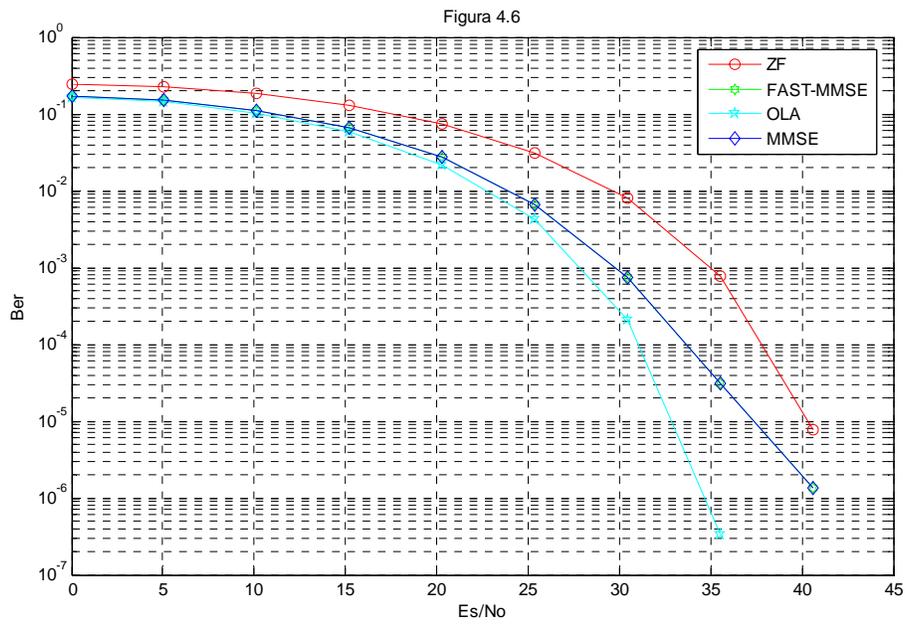
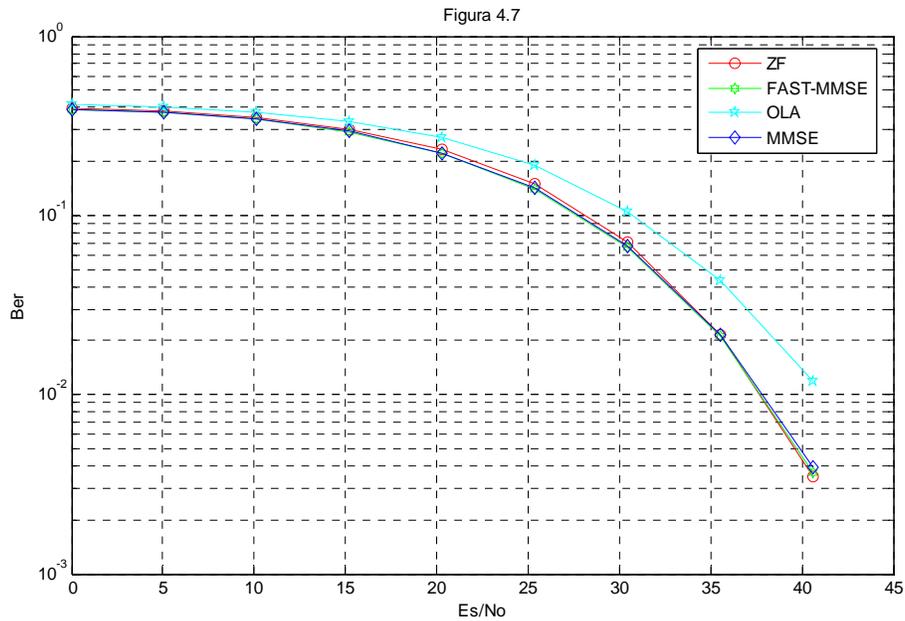


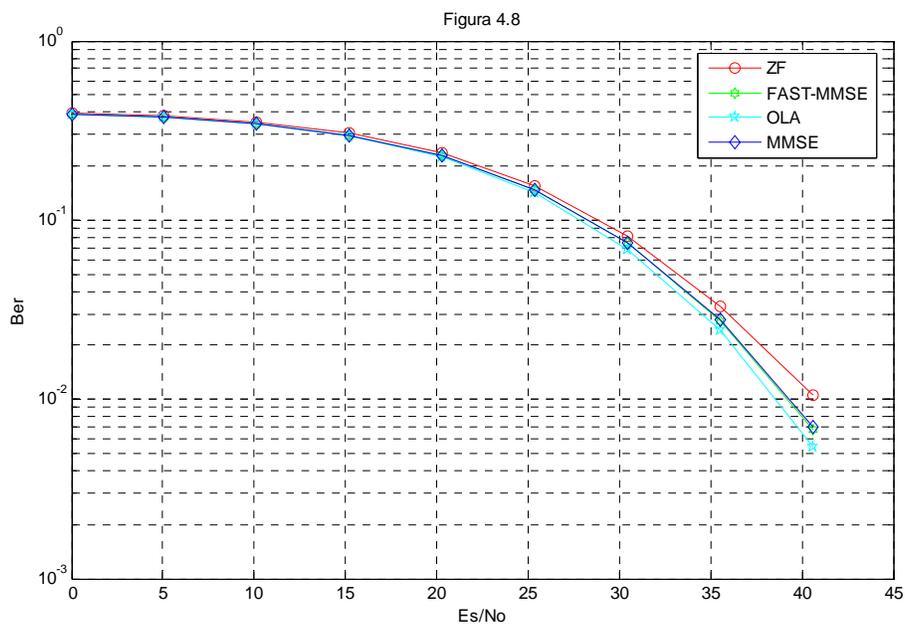
Figura 4.6: ZP-OFDM: J=1 ; Código Hadamard

En el siguiente análisis de nuevo utilizamos códigos aleatorios sin embargo, transmitiremos ocho símbolos de forma simultánea ( $J=8$ ) de forma que si estamos utilizando  $M=64$  portadoras, cada símbolo se enviará utilizando  $M/J$ , es decir  $64/8=8$  chips. De forma que usando las mismas subportadoras que en el caso anterior, mandamos ocho símbolos en lugar de uno. Los resultados se observan en la Figura 4.7



**Figura 4.7:** ZP-OFDM:  $J=8$  ; Códigos aleatorios

Tal y como hicimos anteriormente repetiremos el sistema utilizando códigos de Hadamard ( Figura 4.8) :



**Figura 4.8 :** ZP-OFDM :  $J=8$  ; Código Hadamard

## **4.5 Simulación de un sistema OFDM-CDMA multiusuario**

En este bloque de simulaciones se estudia una variante que se antoja fundamental en los sistemas de CDMA, que no es más que la inclusión de usuarios adicionales, en lugar del caso simple anterior en el que sólo transmite simultáneamente un usuario.

Dentro de las infinitas combinaciones posibles se volverá a centrar el análisis en dos tipos de códigos: los de Hadamard y los aleatorios. Sin embargo en esta ocasión cada usuario utilizará un código diferente de forma que en la recepción se podrán comprobar las ventajas de la utilización de códigos ortogonales, en el caso de usar códigos Hadamard, frente a aquellos que no tienen porque presentar dicha propiedad, como puede ser el empleo de códigos aleatorios.

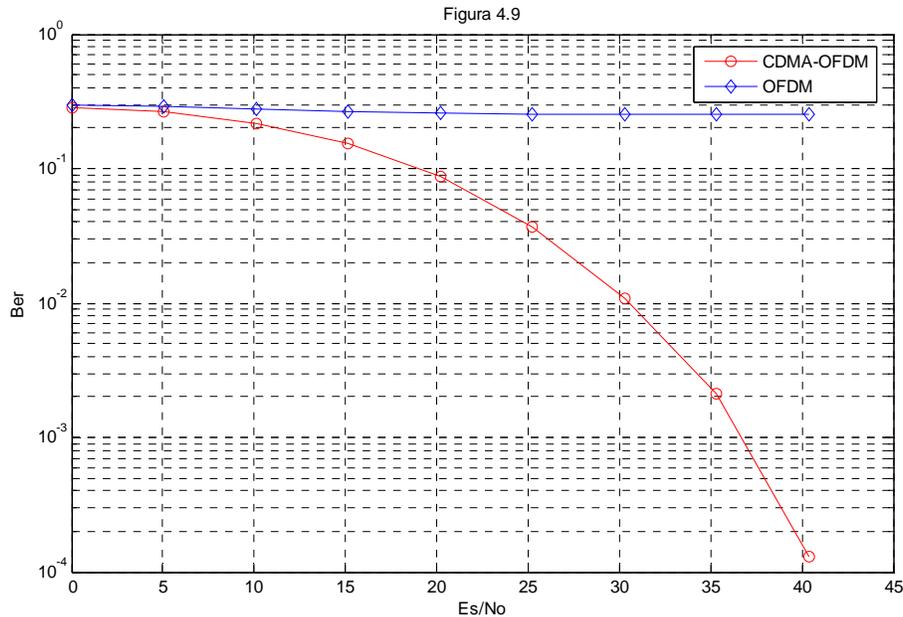
Asimismo de nuevo se estudiará las diferentes situaciones que implican la transmisión simultánea de uno o varios símbolos.

### **4.5.1 OFDM-CDMA con dos usuarios**

En este caso sólo se simularán dos usuarios simultáneamente. Tal y como se comentó anteriormente, cada uno de los usuarios utilizará un código diferente. En recepción, se multiplicará la señal recibida, formada por la combinación lineal de la transmisión de cada uno de los usuarios, por el código que utilizó un usuario determinado en transmisión de forma que se eliminarán todas las componentes de los diferentes usuarios que utilizaron códigos diferentes al del transmisor seleccionado.

Este proceso funcionará correctamente en el caso de utilizar códigos ortogonales, ya que tal y como se vio en apartados anteriores, el producto de dos señales ortogonales entre sí es cero a no ser que se trate del producto de una misma señal por ella misma, por lo que la utilización de códigos aleatorios limitará este comportamiento ideal.

En la primera de estas simulaciones, figura 4.9, se compara el comportamiento de un sistema OFDM convencional frente a un sistema CDMA-OFDM en el caso en el que simultáneamente se transmiten dos señales, es decir, están transmitiendo dos usuarios y además, en el segundo sistema, se codifican los datos. En ambos casos se utilizarán códigos aleatorios y se transmiten simultáneamente un solo símbolo ( $J=1$ ). Tal y como se comentó anteriormente se demodulará únicamente la primera de las dos señales transmitidas de forma que el conjunto de señales, en este caso la suma de dos (cada una correspondiente a un usuario), que llegan al receptor se multiplicarán por el código utilizado en la generación de la primera señal, de forma que el sistema CDMA sí puede discriminar una señal determinada dentro del conjunto de varias señales que se envían a la vez, fenómeno que un sistema OFDM normal no puede hacer con las consecuencias lógicas que se pueden observar en la figura.



**Figura 4.9:** OFDM Vs OFDM-CDMA con dos usuarios

Comprobamos el mejor comportamiento del sistema CDMA , que aunque soporte la transmisión simultánea de dos usuarios , el hecho de codificar cada señal de forma individual y después decodificar el resultado hace que su comportamiento frente a las interferencias mejora el caso sencillo que es prácticamente inviable puesto que presenta , tal y como se preveía , una elevadísima tasa de error debida a que la transmisión de un segundo usuario es interpretada como interferencia por el primer usuario , es decir como un ruido aditivo adicional.

Se estudiará de nuevo el caso comparativo de los cuatro tipos de receptores para los distintos casos de apartados anteriores, es decir, variando el código, el número de símbolos transmitidos simultáneamente, etc.

En la simulación 4.10, se estudia un sistema CDMA-OFDM en el que se transmite únicamente un símbolo simultáneamente y se utilizan códigos aleatorios .Se puede destacar el hecho de que cada usuario manda una información diferente y por supuesto con un código diferente.

En la siguiente figura (4.11) no se utilizarán códigos aleatorios, sino que cada uno de los usuarios utilizará un código de hadamard. Para ello cada código se tomará de dos columnas distintas de una matriz de Hadamard generada previamente.

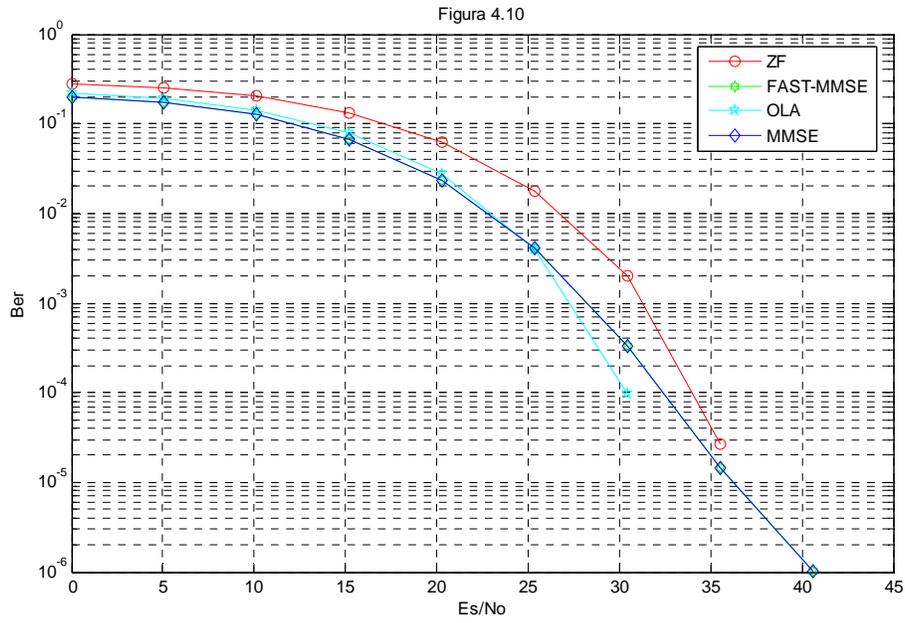


Figura 4.10: ZP-OFDM : J=1 ; Código aleatorio; 2 usuarios

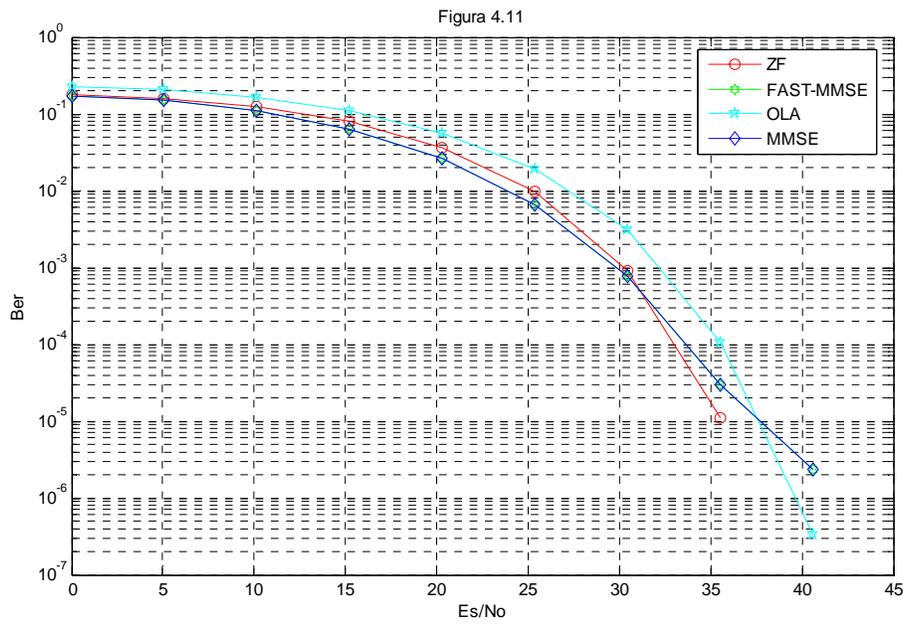
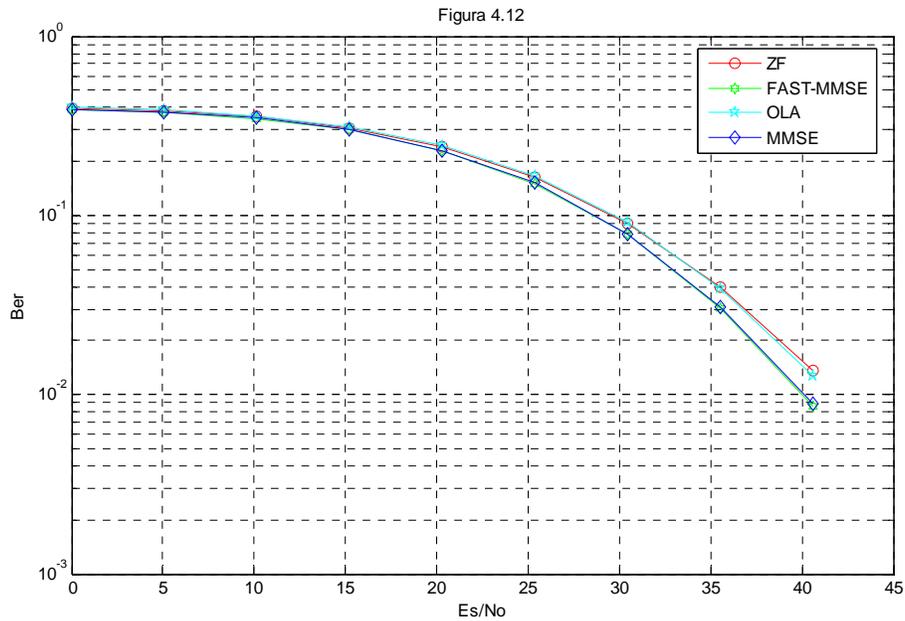


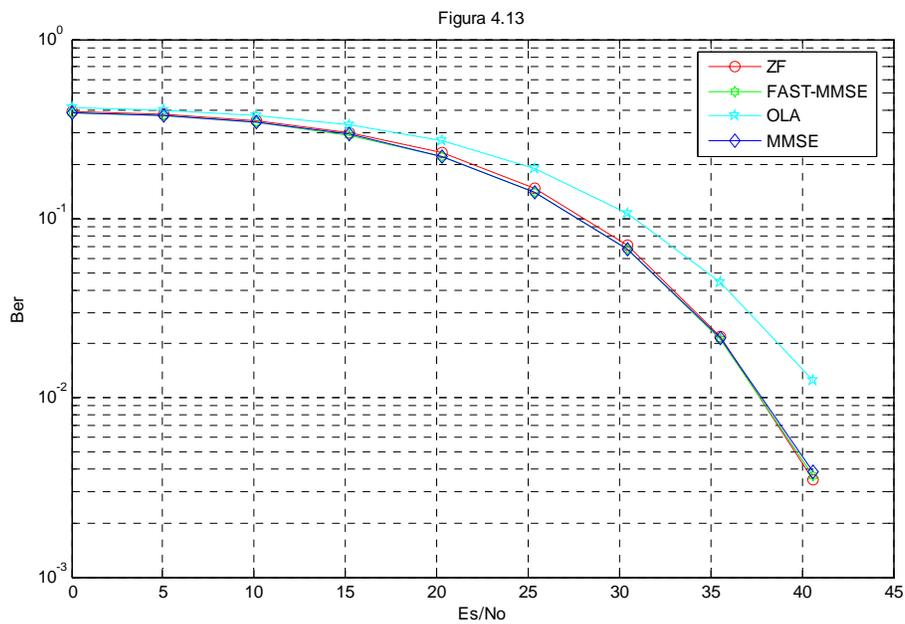
Figura 4.11: ZP-OFDM : J=1 ; Código Hadamard; 2 usuarios

En el siguiente par de simulaciones que se representan en las figuras 4.12 y 4.13 se pueden comprobar los resultados obtenidos para los cuatro tipos de receptores en el caso de que se transmitan 8 símbolos simultáneamente, utilizando tanto códigos aleatorios como de Hadamard.



**Figura 4.12:** ZP-OFDM: J=8 ; Códigos aleatorios;2 usuarios

Para finalizar este apartado en la figura 4.13 se pueden observar los resultados de la simulación en la que se establecen las mismas condiciones de la simulación anterior salvo la utilización de códigos de Hadamard en lugar de aleatorios.



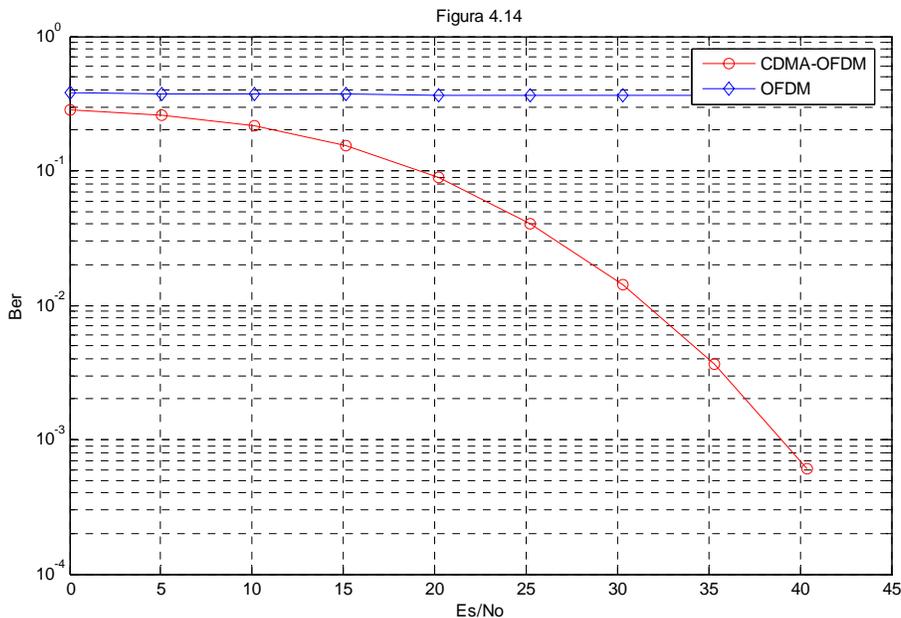
**Figura 4.13 :** ZP-OFDM : J=8 ; Código Hadamard;2 usuarios

### 4.5.2 OFDM-CDMA con ocho usuarios

En este conjunto de simulaciones se aumenta el número de usuarios hasta la cifra de ocho. Como es lógico pensar, un aumento de usuarios implica un aumento en las interferencias ya que el volumen de información a transmitir de manera independiente es mayor. Es decir el fenómeno que se observa en la simulación 4.9 se verá ahora acentuado.

Tal y como se procedió en el apartado anterior cada una de las fuentes de información procedente de un usuario diferente será totalmente independiente de las restantes, aunque toda y cada una de ellas presenta carácter aleatorio. Además cada conjunto de datos se codificará por un código distinto, la naturaleza de los cuales dependerá de la simulación a realizar.

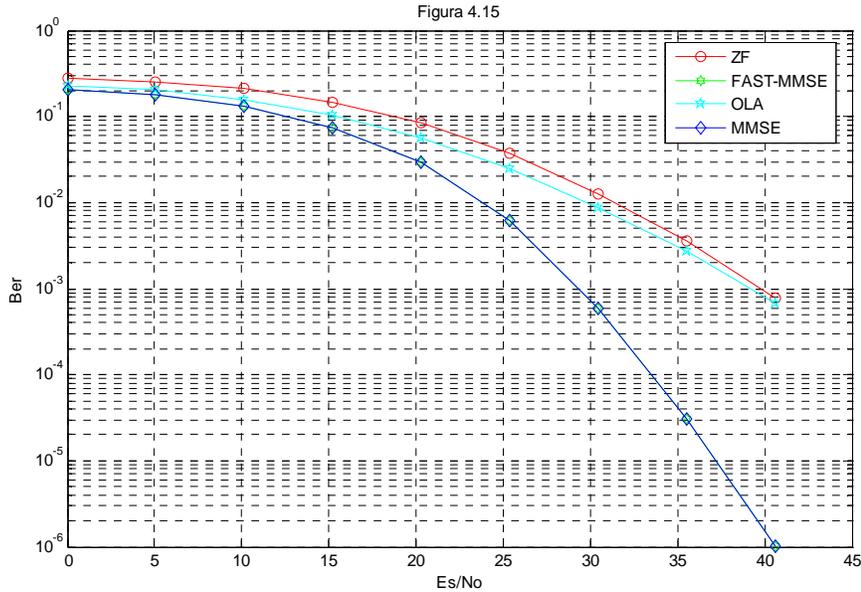
Así pues, de nuevo la primera simulación se basa en la comparativa de un sistema OFDM frente a un CDMA-OFDM multiusuario, en esta ocasión formada por ocho usuarios y en la que se puede observar la mejora introducida por CDMA a pesar de incrementar el número de usuarios que este caso será mayor que en el apartado anterior puesto que como ya se comentó anteriormente, al incrementar el número de usuarios también se eleva la interferencia.



**Figura 4.14:** OFDM Vs OFDM-CDMA con ocho usuarios

Tal y como se predijo la mejora introducida por el sistema codificado es notable ya que en este caso la probabilidad de poder discernir una señal dentro de una suma de ocho diferentes sin existir una codificación previa es muy pequeña por lo que tal y como se observa en la figura la probabilidad de error será elevada. De hecho esta probabilidad (aproximadamente de 0.3 independiente de la energía de símbolo) es incluso mayor que la obtenida en la simulación 4.9 (de valor 0.2) ya que se ha introducido más ruido, es decir seis usuarios más.

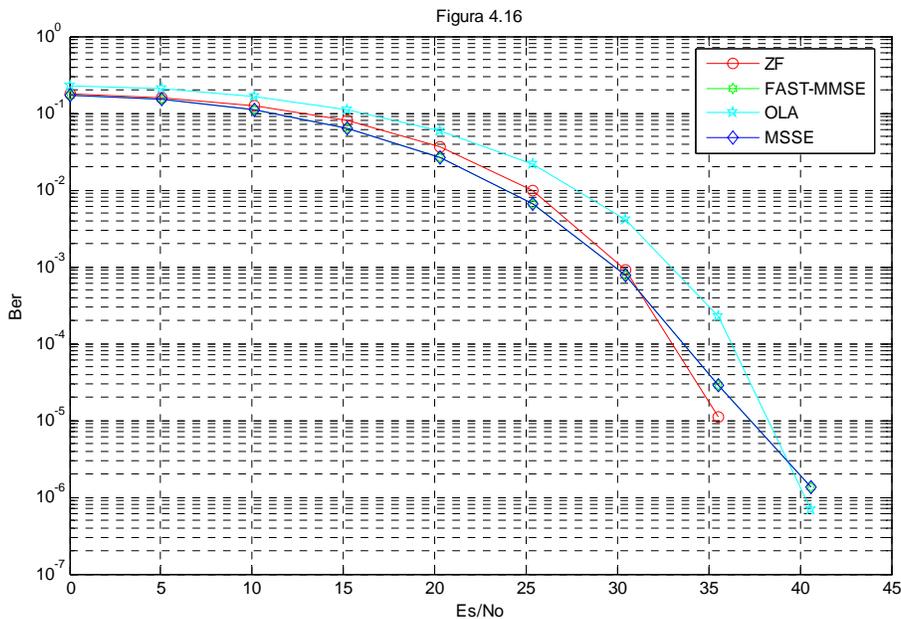
Tal y como se simuló en capítulos anteriores, el siguiente sistema será, de nuevo para ocho usuarios, el formado por códigos aleatorios y de transmisión unitaria (un símbolo por portadora;  $J=1$ ) .Los resultados son los siguientes:



**Figura 4.15:** ZP-OFDM :  $J=1$  ; Código aleatorio; 8 usuarios

En este caso se puede observar que los ecualizadores que presenta mejores prestaciones son los MMSE's frente al basado en métodos OLA, aunque éste presenta una menor complejidad computacional en el diseño.

En la figura 4.16 se realiza una simulación parecida salvo que se emplean códigos ortogonales, en este caso columnas de una matriz de Hadamard.

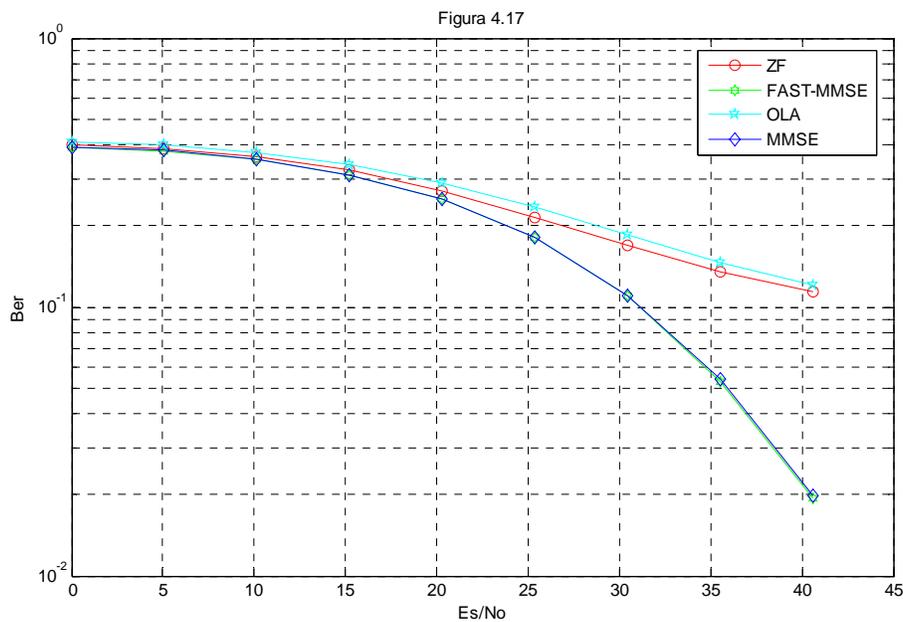


**Figura 4.16:** ZP-OFDM :  $J=1$  ; Código Hadamard; 8 usuarios

Es destacable que este caso, el receptor ZF mejora sus prestaciones aunque no es más que una mejora dentro de la tónica general de los cuatro receptores, cuyas prestaciones se incrementan en el caso de que se empleen códigos ortogonales.

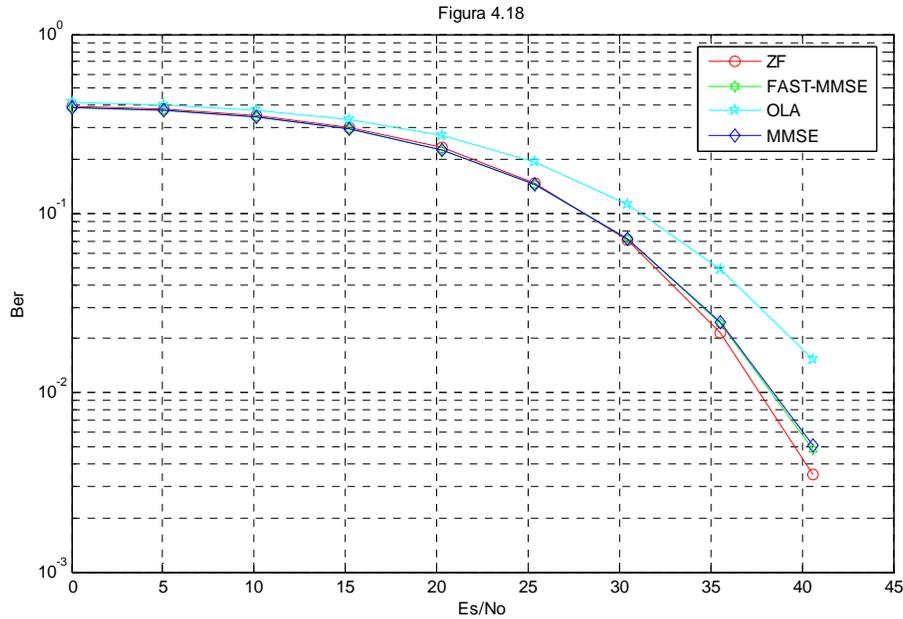
Siguiendo con el caso particular un sistema con ocho usuarios, se analizará ahora el caso de la transmisión múltiple por portadora. En particular se transmitirán ocho símbolos por portadora ( $J=8$ ) en el caso de que se transmitan los símbolos utilizando códigos aleatorios los resultados son los mostrados en la figura 4.17.

Tal y como se puede ver en dicha figura, vemos que las prestaciones de los cuatro receptores en general disminuye de forma ostensible, por lo que se puede deducir que el precio por aumentar la información por portadora no es más que un aumento en la tasa de error de bit, de forma que la naturaleza de la información a transmitir será uno de los parámetros de mayor peso a la hora de utilizar este tipo de sistemas.



**Figura 4.17:** ZP-OFDM:  $J=8$  ; Códigos aleatorios;8 usuarios

Por último en la figura 4.18 se representa el mismo caso anterior pero utilizando códigos aleatorios de forma que es lícito aventurar que los efectos de aumentar el número de símbolos se verá reducido en cierta manera.



**Figura 4.18:** ZP-OFDM: J=8 ; Código Hadamard;8 usuarios

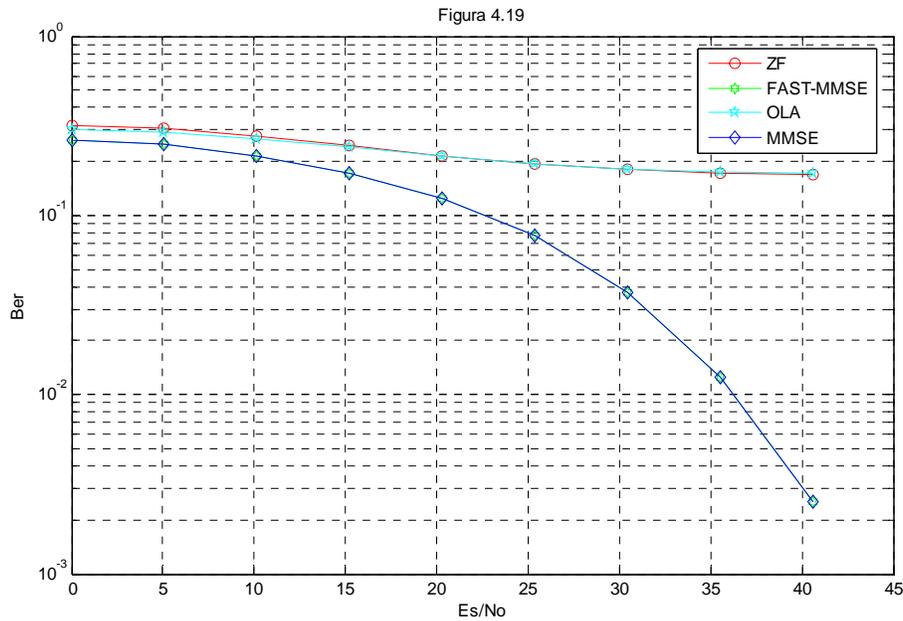
Comprobamos que efectivamente la mejora se produce aunque a niveles de SNR de la señal transmitida relativamente altos.

#### **4.5.3 OFDM-CDMA con sesenta y cuatro usuarios**

Como un caso relativamente extremo, se representará un sistema en el que serán 64 los usuarios que transmitan simultáneamente. Para este número elevado de transmisiones, se estudiarán de nuevo diferentes casos en los que se variarán de nuevo los códigos así como el número de portadoras a utilizar para transmitir un símbolo.

Sin embargo en esta ocasión se obviará la simulación de la comparativa entre sistemas OFDM sin codificar y CDMA-OFDM ya que los resultados a obtener serían ciertamente parecidos a los calculados anteriormente y por lo tanto carecen de interés.

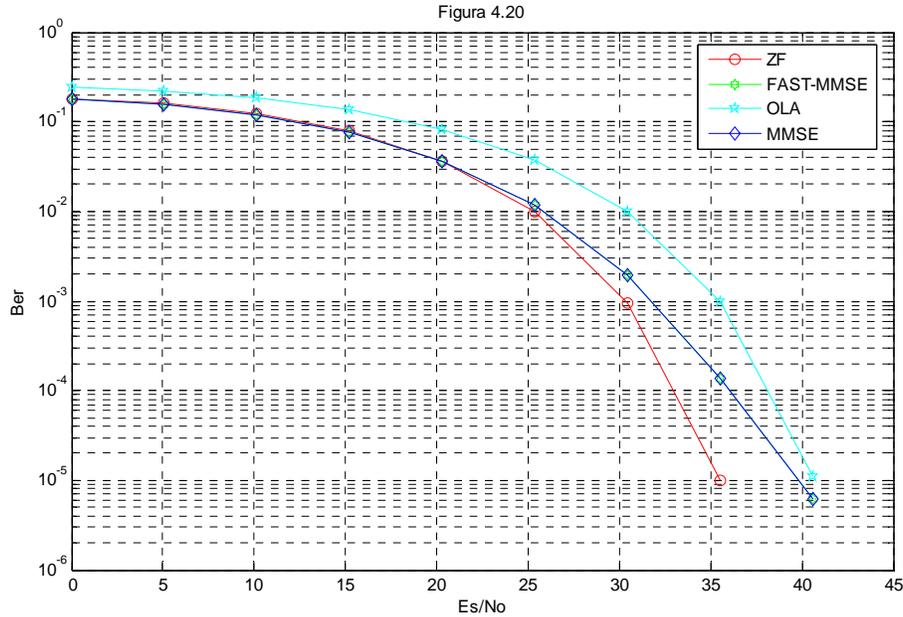
En la primera de las gráficas representadas, figura 4.19, se observa el comportamiento de un sistema que utiliza todas las subportadoras para transmitir un símbolo (J=1) y que se sirve de un sistema de codificación puramente aleatorio, de forma que cada uno de los 64 usuarios utilizará un código aleatorio diferente al resto.



**Figura 4.19:** ZP-OFDM: J=1 ; Código aleatorio; 64 usuarios

Como queda manifiestamente claro en la figura, el comportamiento de los receptores MMSE es bastante más eficiente que el de los otros dos receptores, un efecto que ya se podía observar en la figura 4.15 (un sistema con las mismas características pero con 8 usuarios en lugar de 64) pero que en esta ocasión se manifiesta de una forma más clara.

El siguiente sistema a simular es un sistema con características parecidas al anterior salvo que en este caso los códigos a utilizar son ortogonales. En este caso se recurrirá a una de las 64 columnas de una matriz Hadamard de similares dimensiones para cada uno de los 64 usuarios.



**Figura 4.20:** ZP-OFDM: J=1 ; Código Hadamard;64 usuarios

Tal y como se pudo observar en la figura 4.16, en la que se simulaba un sistema de las mismas características que este salvo que contaba con 8 en lugar de con 64 usuarios, o incluso en la figura 4.11 en la que el experimento contaba sólo con 2 usuarios, la inclusión de códigos de Hadamard supone un aumento en las prestaciones por parte de los receptores ZF frente al resto.

Siguiendo este exhaustivo análisis, se realizará un estudio de los sistemas anteriores añadiendo la variante de incrementar el número de símbolos que se transmitirán por las subportadoras, es decir se variará el valor de  $J=1$ , utilizado hasta ahora por  $J=8$ , por lo que como ya se comentó anteriormente, se transmiten de forma simultánea 8 símbolos. Esta posibilidad se representará de nuevo tanto para códigos aleatorios como para códigos de Hadamard.

La figura 4.21 representa el primero de estos sistemas. Los resultados son totalmente inadmisibles ya que proporcionan una tasa de error de bit que haría cualquier sistema inviable.

En la próxima figura, la figura 4.22, se podrá comprobar si el uso de códigos aleatorios es el principal argumento para justificar este resultado, ya que en este caso los códigos a utilizar serán ortogonales entre sí.

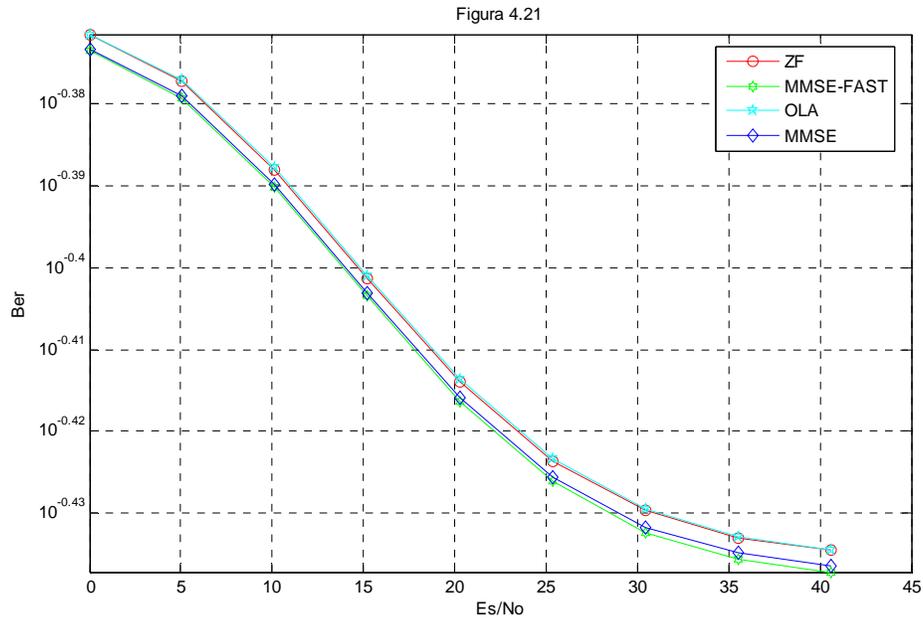


Figura 4.21: ZP-OFDM: J=8 ; Códigos aleatorios; 64 usuarios

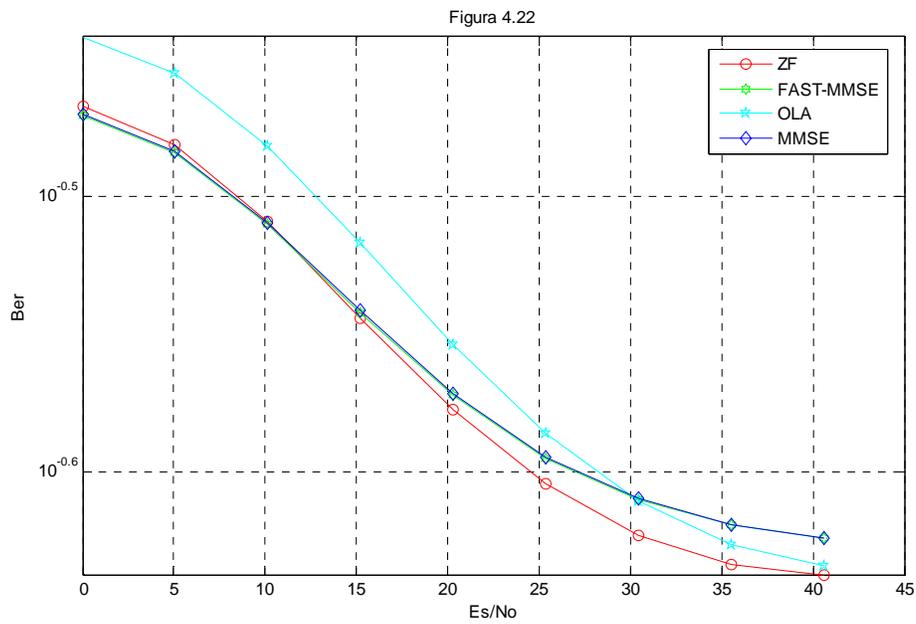
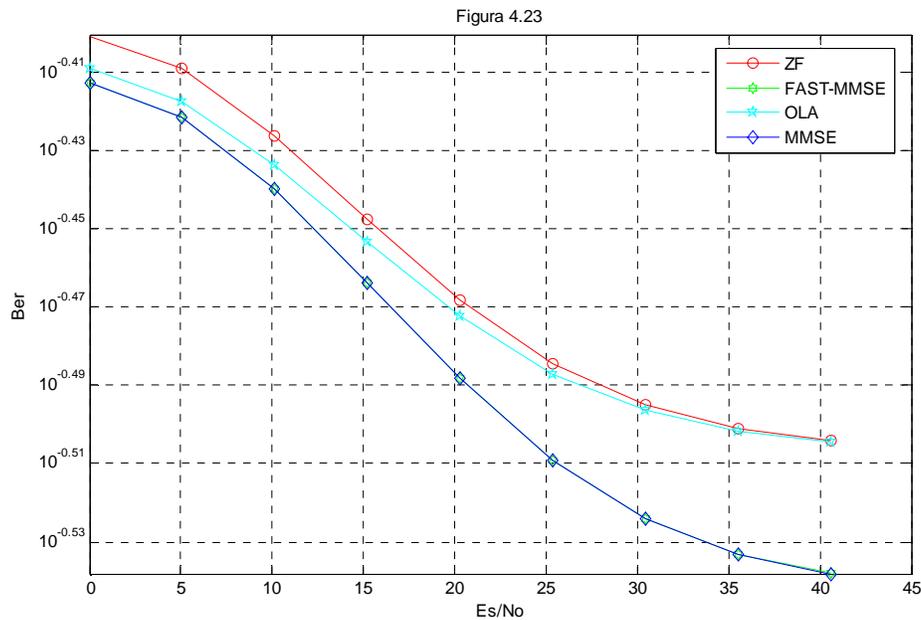


Figura 4.22: ZP-OFDM: J=8 ; Código Hadamard; 64 usuarios

Tal y como se puede observar, aunque la tasa registra un cierto un cierto decremento este es lo suficientemente liviano como para considerar que el sistema continúe siendo inabordable.

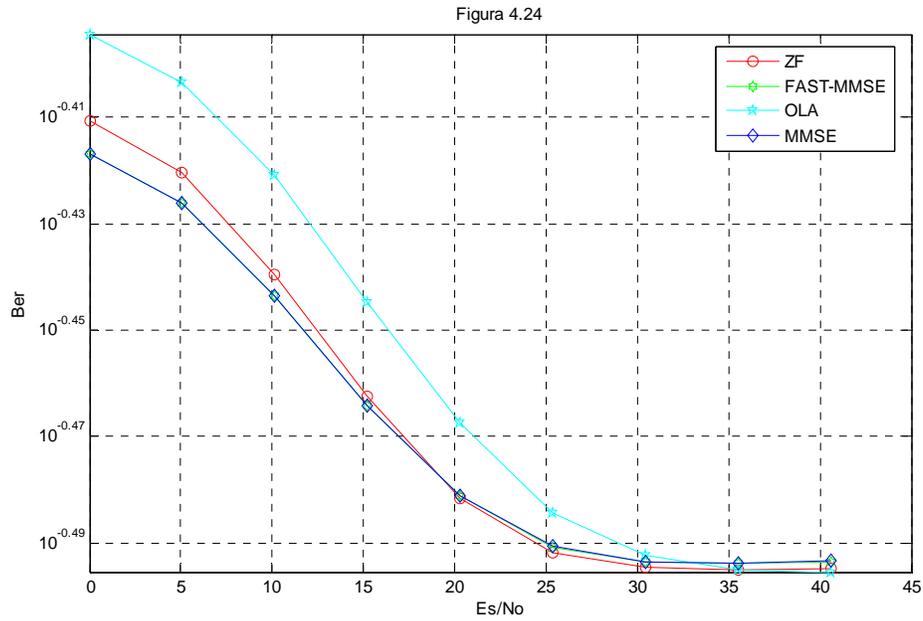
La siguiente opción pues, será decrementar el número de símbolos transmitidos simultáneamente, (es decir el valor del parámetro  $J$ ) de forma que podamos comprobar si la BER disminuya de forma considerable. La figura 4.23 muestra que en ningún caso esto se produce, en el caso de que se empleen códigos aleatorios, aunque el número de símbolos transmitidos a la vez disminuya de 8 a 4.



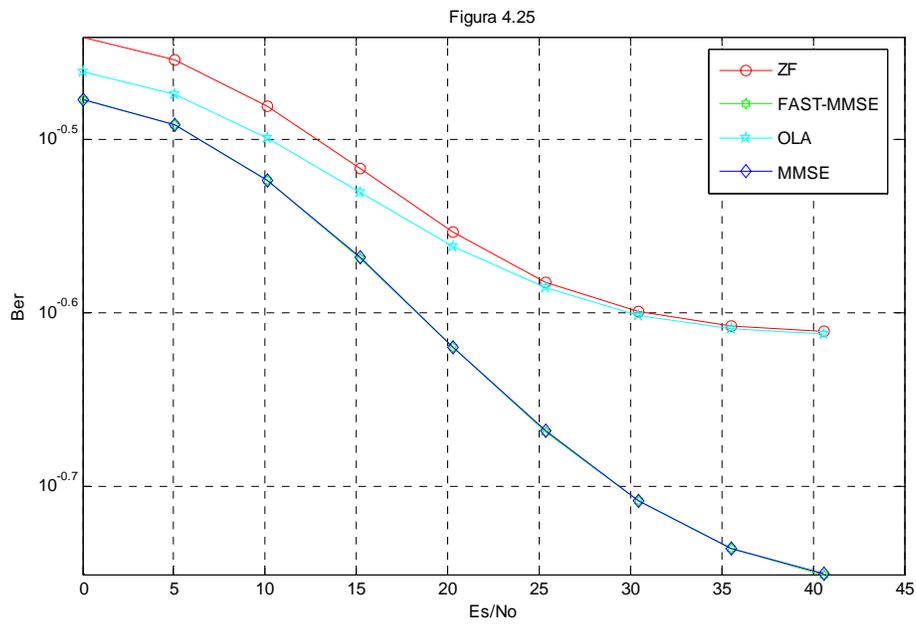
**Figura 4.23:** ZP-OFDM:  $J=4$  ; Códigos aleatorios; 64 usuarios

Para el mismo caso de reducción de  $J$  pero en el caso de códigos ortogonales, los resultados, tal y como se deducen de la figura 4.24, no ofrecen una mejora concluyente.

Llegados a este punto, la última opción digna de estudio será imponer que el valor de  $J$  se reduzca incluso a 2, es decir que cada símbolo utilizará  $64/2=34$  subportadoras para ser transmitido, o lo que es lo mismo, la transmisión simultánea de 2 símbolos utilizando códigos aleatorios. Los resultados se observan en la figura 4.25



**Figura 4.24:** ZP-OFDM : J=4 ; Código Hadamard; 64 usuarios



**Figura 4.25:** ZP-OFDM : J=2 ; Códigos aleatorios; 64 usuarios

Así pues se concluye que en el sistema planteado encontramos una limitación bastante importante en el número de usuarios que utilizan el sistema junto con el número de símbolos transmitidos simultáneamente más que por otros parámetros que serán restrictivos en menor medida como puede ser la variación del número de símbolos transmitidos simultáneamente o el empleo de códigos diferentes. Sin embargo se debe caer en la cuenta que en todos los casos se ha fijado como parámetro el canal por donde deben viajar los símbolos y que puede decantar muy a las claras qué tipo de receptor será óptimo en cada caso.

A continuación el estudio se amplía con diferentes alternativas como la variación del canal, la comparativa entre códigos e incluso entre sistemas que soportan, bajo las mismas condiciones, diferente número de usuarios transmitiendo.

#### **4.6 Comparativa de un sistema OFDM-CDMA en canales diferentes**

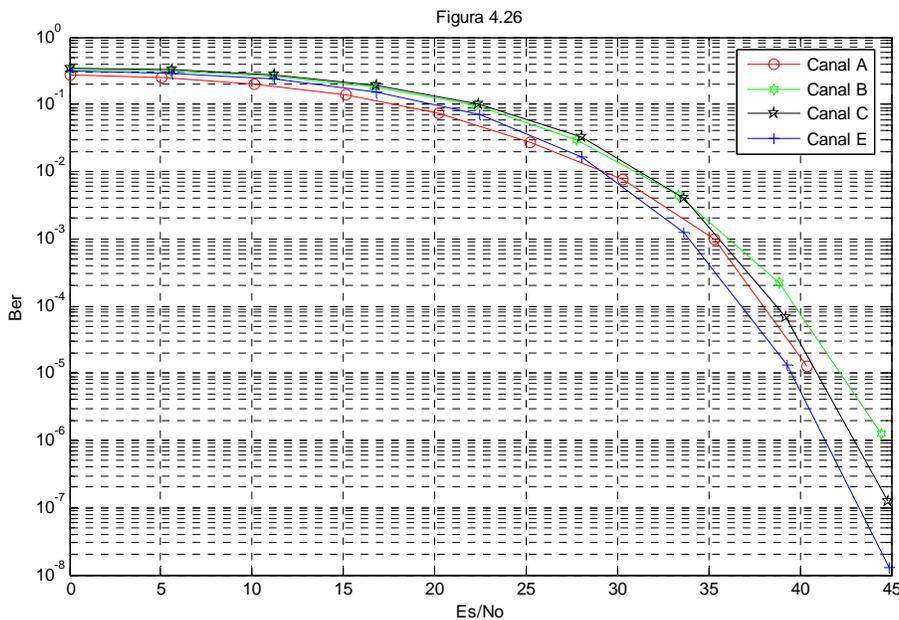
En este caso se pretende estudiar las características de diferentes canales, para lo cual sobre un sistema con las mismas características en el transmisor y en el receptor, se variarán los canales por donde viaja la información de forma que mediante la tasa de error de bit que presenta cada uno de ellos, se puedan ver las bondades o los perjuicios de cada canal en particular.

Asimismo también se variará el receptor de forma que se puedan establecer una comparativa de la consistencia de cada uno de ellos frente a los diferentes canales.

Los canales sobre los que se realizarán el estudio serán diferentes modelos de canal Hiperlan/2. Concretamente el estudio se basa en la utilización de canales tipo A, B, C y E. Estos diferentes modelos se obtienen mediante una función de MATLAB que como parámetro de entrada, recibe precisamente el tipo de modelo que se quiere utilizar. No obstante todos los modelos a utilizar presentan ciertas características comunes como son que la velocidad del transmisor es de 0 m/s (receptor en estado de reposo) o la frecuencia de la portadora que será de 5.2 Ghz.

Cada uno de los distintos modelos de canal implica un incremento en la complejidad de los mismos, que viene dada por un aumento en el número de muestras del canal así como en la cantidad de muestras nulas. De esta forma el modelo de canal A (que será el más simple de todos) presenta 9 muestras de las cuales ninguna es nula, el modelo B tiene 16 muestras y 2 nulas, el modelo C posee 8 muestras de valor nulo de un total de 22 y por último, el modelo más complejo de todos, el E, de las 36 muestras que tiene 21 son ceros.

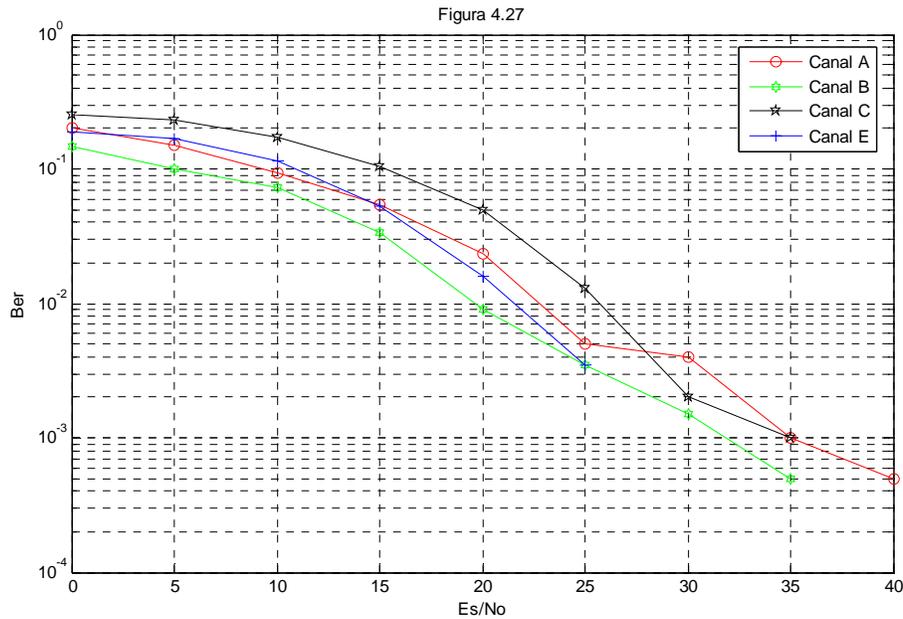
Las primera de las simulaciones a realizar, la representada en la figura 4.26 representan un sistema con un receptor Zero-Forcing.



**Figura 4.26:** ZP-OFDM-ZF con canales A,B,C y E .

En este caso las diferencias no son muy significativas, sin embargo no es previsible que suceda lo mismo en el caso de utilizar otro receptor, tal y como se hace en la siguiente simulación.

El siguiente análisis se realiza bajo unas condiciones parecidas a la simulación anterior, sin embargo en esta ocasión se utilizará un receptor de máxima verosimilitud MMSE.



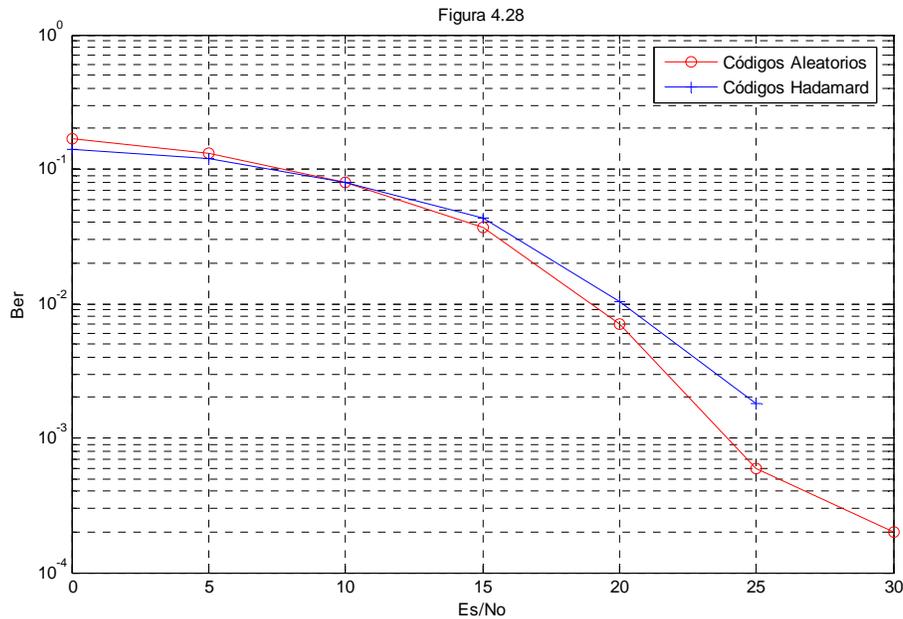
**Figura 4.27:** ZP-OFDM-MMSE con canales A,B,C y E .

### **4.7 Comparativa de códigos en un sistema OFDM-CDMA-MMSE**

En los análisis presentados a continuación, el parámetro cuya variación pretendemos variar es el del tipo de códigos a utilizar y el número de usuarios del sistema, de forma que el resto de los parámetros, como el caso del tipo de receptor que será un MMSE, permanecerán constantes.

En cuanto al primero de los parámetros, se comparará el efecto de emplear códigos aleatorios frente a códigos de Hadamard, y el número de usuarios será el caso unitario o hasta un número de ocho transmitiendo simultáneamente.

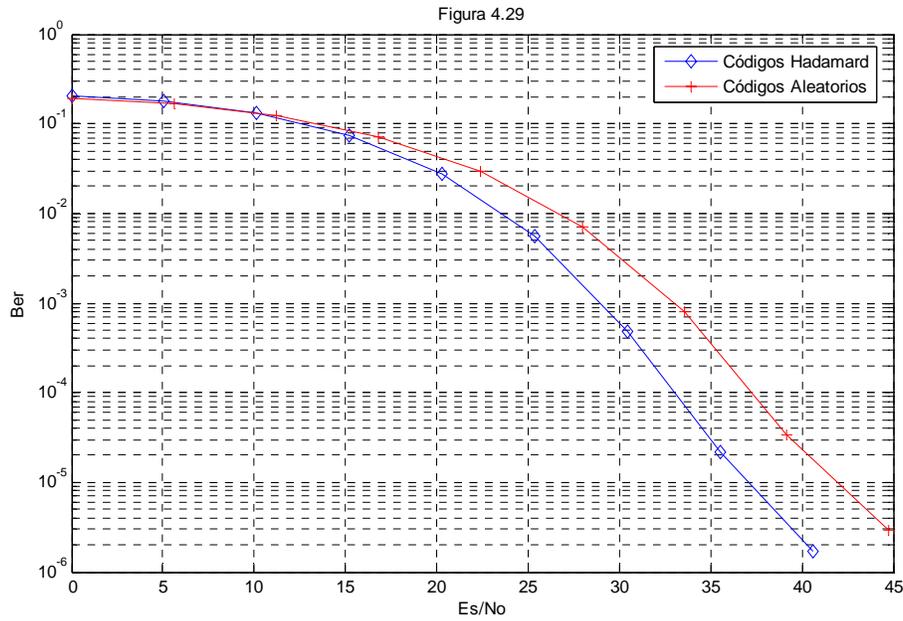
De tal forma que en la simulación de la figura 4.28 se establece una comparativa de dos sistemas con códigos diferentes (los ya mencionados aleatorios o de Hadamard) para un solo usuario.



**Figura 4.28:** ZP-OFDM-MMSE códigos aleatorios Vs códigos Hadamard (1 usuario).

Se comprueba el mejor comportamiento de los códigos ortogonales (ya que el programa MATLAB deja de representar los valores nulos, de forma que en el caso de los códigos Hadamard, la gráfica empieza a valer cero a partir de valores de SNR de 25 y por lo tanto presenta un mejor comportamiento)

A continuación (figura 4.29) se muestran los resultados para el caso multiusuario, más concretamente para ocho usuarios.



**Figura 4.29:** ZP-OFDM-MMSE códigos aleatorios Vs códigos Hadamard (8 usuarios).

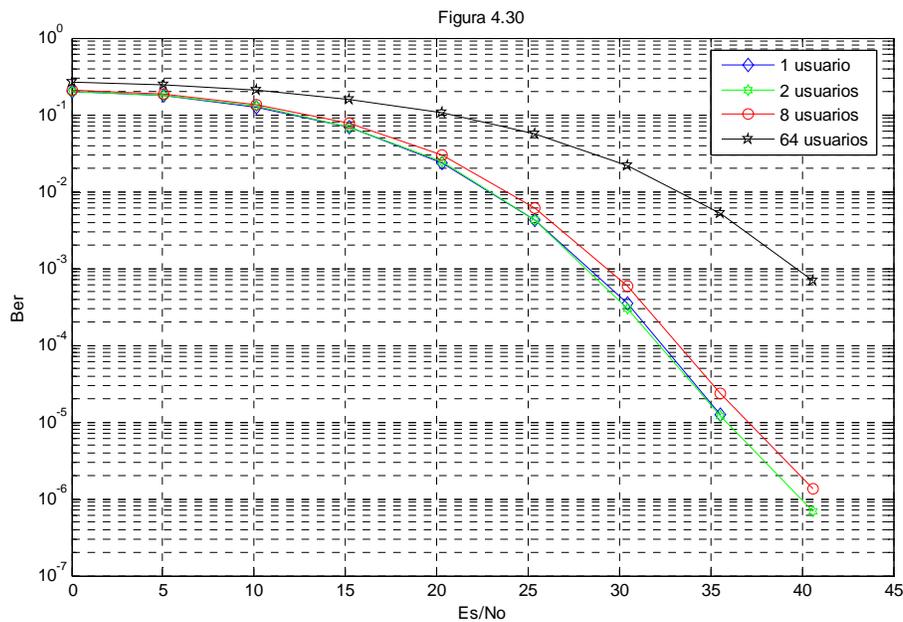
Se comprueba como en el caso multiusuario, las propiedades de ortogonalidad de los códigos Hadamard, permite a los sistemas que utilicen este tipo de códigos, un mejor comportamiento en cuanto a la tasa de error de bit se refiere.

### 4.8 Estudio del número de usuarios en un sistema OFDM

En este último apartado se estudiará el efecto que sobre la tasa de error de bit introduce un incremento del número de usuarios del sistema.

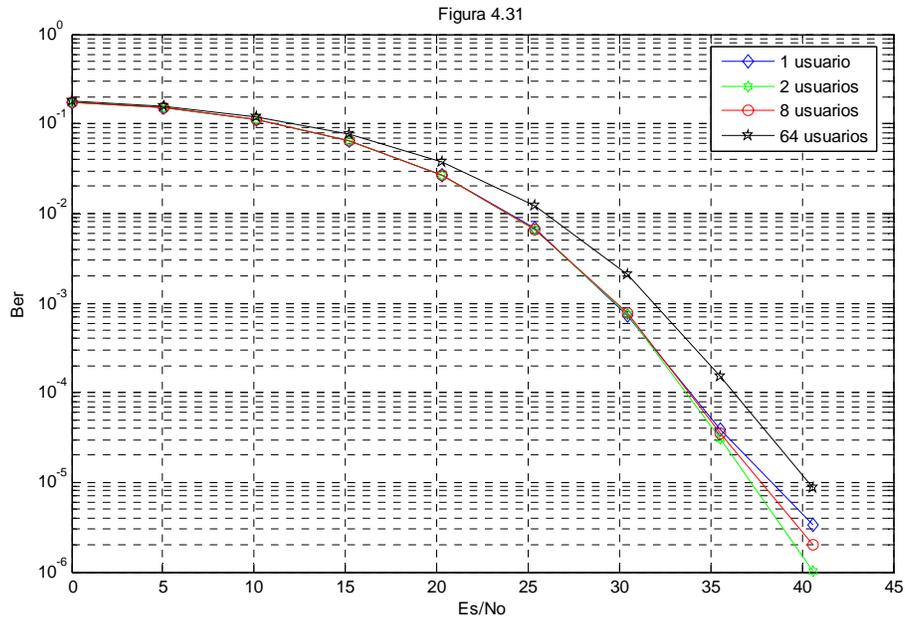
Para ello, se fijarán todas las características del sistema, en este caso se tratará de un sistema con receptor MMSE, en el que se transmite un símbolo simultáneamente ( $J=1$ ) y el código a utilizar será de naturaleza aleatoria.

En la figura 4.30 se puede observar como las prestaciones del sistema son inversamente proporcionales al número de usuarios que estén utilizando simultáneamente el mismo.



**Figura 4.30:** ZP-OFDM-MMSE comparativa: 1, 2, 8 y 64 usuarios. (códigos aleatorios)

Por último se corrobora la apreciación anterior simulando un sistema idéntico al anterior con la salvedad de que se utilizarán códigos ortogonales de Hadamard.



**Figura 4.31:** ZP-OFDM-MMSE comparativa: 1,2,32 y 64 usuarios.(codigos Hadamard)

En esta ocasión comprobamos como las propiedades de ortogonalidad de los códigos utilizados, permite que hayan escasas diferencias entre un número de usuarios no muy elevado (de un solo usuario a ocho) y sólo en el caso de que se aumente el número hasta 64 empiezan a notarse ciertas diferencias que en cualquier caso no son tan pronunciadas como en el caso aleatorio.