CAPÍTULO 5:
DIVERSIDAD

5.1 Introducción

El término **diversidad** hace referencia a la cantidad de realizaciones del canal que se tienen en recepción. Con otras palabras, la diversidad hace referencia a la cantidad de información que, sobre el canal tenemos en recepción. Si se conoce mejor el canal en recepción, se pueden también estimar los símbolos transmitidos con mayor fiabilidad. Las características de transmisión mejorarán cuanto más independientes sean las realizaciones del canal y por tanto cuanto mayor sea la diversidad (o cantidad de información sobre el canal) de que se disponga en el sistema.

La **diversidad** es la técnica más importante para mejorar las características de un sistema de comunicación en un canal *fading*. Los datos recogidos de las distintas realizaciones del canal, serán combinados de la forma más adecuada para aumentar la fiabilidad de dichos datos.

Por ejemplo, si un determinado bloque de bits se transmite varias veces a través del canal, en recepción tendremos mayor cantidad de información sobre el canal por el que se han transmitido. Así, combinando las distintas muestras del bloque de bits recibidos (que serán independientes entre sí puesto que se enviaron en instantes de tiempo distintos), puede estimarse el canal con mayor fiabilidad y por tanto también la información transmitida. Este es un ejemplo de diversidad temporal.

Las técnicas más comunes de diversidad son diversidad temporal, diversidad en frecuencia y espacial:

• **Técnicas de diversidad temporal:** Se transmiten los mismos datos en intervalos de tiempo diferentes. Es decir, se transmiten varias réplicas de la misma información.

• **Técnicas de diversidad espacial**: Se utilizan simultáneamente dos antenas separadas físicamente lo suficiente para asegurar que la correlación de ambas es inferior a un valor prefijado. Se hace uso del hecho de que el *fading* es, al menos en parte, independiente en distintos puntos del espacio.

• **Técnicas de diversidad frecuencial:** Se transmiten simultáneamente dos señales en frecuencias distintas, es decir, empleando múltiples portadoras.

La diversidad espectral es efectiva cuando el canal en el que se trabaja (como en el caso de estudio) es selectivo en frecuencia. La diversidad como vamos a estudiarla, puede ser explotada cuando el ancho de banda del canal de transmisión es lo suficientemente grande como para poder resolver componentes *multipath* individuales. OFDM es, por tanto, un ejemplo de sistema que puede tomar los beneficios de diversidad.

5.2. Diversidad en OFDM

En éste apartado, se realiza un estudio de la **pérdida** de diversidad de la técnica Multiplexión por División Ortogonal en Frecuencia. Se obtendrá el valor de dicha pérdida así como sus causas y consecuencias.

La modulación OFDM es la principal técnica utilizada en transmisiones de área local sin cable gracias a las altas velocidades de datos alcanzables y a su robustez frente a interferencias intersímbolo (ISI). Para ello se introduce, como se

describe en el apartado 3.3.2 del capítulo 3, intervalo de guarda que consiste, segun si estamos trabajando con CP-OFDM o con ZP-OFDM en taps distintos.

OFDM conlleva una escasa complejidad de procesado de señales, pero al mismo tiempo **se pierde diversidad multitrayecto**, que quedará reducida a un orden de (N_{IG} +1) como se demuestra a continuación.

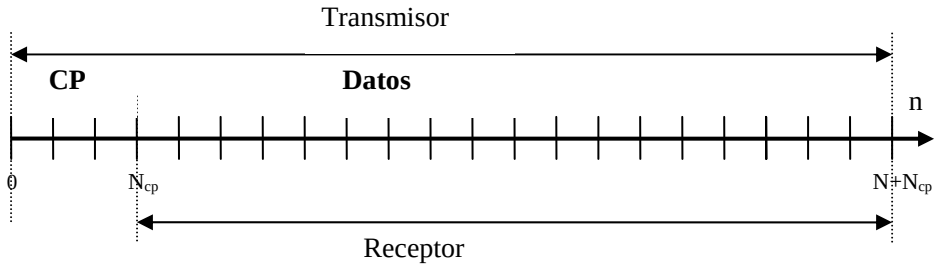
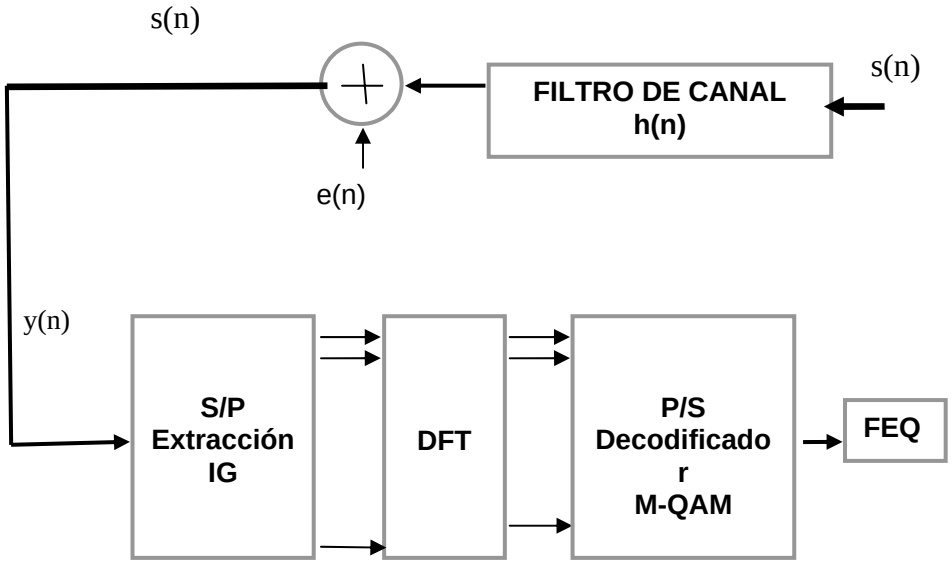


Figura 5.1. Esquema de inclusión del Prefijo Cíclico en un símbolo OFDM

Nótese que se transmiten datos de n = 0, y hasta n = $N+N_{IG}$-1. Pero en el receptor, sólo interesarán los datos recibidos entre n = 0,…N-1. El Intervalo de guarda será descartado. En la figura 5.2, se muestra un esquema con los bloques del receptor que interesan para el análisis.



Figua 5.2. Bloque receptor en un sistema OFDM

Para hacer un estudio de la diversidad, se estudia un bloque de $N+N_{IG}$ símbolos de la codificación que constituyen un símbolo OFDM x(n). En éste caso, la respuesta al impulso del canal será $\{h_0,\ldots h_L\}$, siendo L la longitud de dicha respuesta al impulso. Así, podemos escribir:

$$y(n) = x(n) \otimes h(n) = \sum_{k=0}^{L-1} h(k)x(n-k) + e(n)$$

donde *e(n)* es el ruido aditivo y gaussiano. Al introducir el prefijo cíclico, estamos tomando los N_{cp} últimos bits del símbolo OFDM y copiándolos al principio: $x_0 = x_{N-1}, x_1 = x_N, \ldots x_{N\,cp} = x_{N+Ncp-1}$.

Nota.- Normalmente al pasar una señal cualquiera x(n) a través de un filtro h(n), el resultado y(n) es la convolución de ambos. Al introducir el Prefijo Cíclico, estamos convirtiendo además la convolución en una convolución circular como demuestran a continuación las matrices.

Para realizar la demostración que nos ocupa, emplearemos la representación matricial del sistema OFDM, que vamos a considerar de la siguiente manera. Podemos escribir la respuesta del canal en general como:

$$\begin{bmatrix} y_{N+N_{IG}-1} \\ y_{N+N_{IG}-2} \\ \vdots \\ y_1 \\ y_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_0 & h_1 & \cdots & \cdots & h_L & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & h_0 & h_1 & \cdots & h_{L-1} & h_L & 0\cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0\cdots & 0 & h_0 & h_1 & \cdots & h_{L-1} & h_L & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & h_0 & h_1 & \cdots & h_{L-1} & h_L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{N+N_{IG}-1} \\ x_{N+N_{IG}-2} \\ \vdots \\ x_1 \\ x_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{N+N_{IG}-1} \\ e_{N+N_{IG}-2} \\ \vdots \\ e_1 \\ e_0 \end{bmatrix}$$

Otra forma común de escribirla es, como sigue a continuación con una matriz S de Toeplitz con la que es más fácil ver la pérdida de diversidad:

$$y = Sh + e$$

Quedando definida la matriz S:

$$\begin{bmatrix} y_{N+N_{IG}-1} \\ y_{N+N_{IG}-2} \\ \vdots \\ y_1 \\ y_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{N+N_{IG}-1} & x_{N+N_{IG}-2} & \cdots & x_{N+N_{IG}-(L+2)} & x_{N+N_{IG}-(L+1)} \\ x_{N+N_{IG}-2} & x_{N+N_{IG}-1} & \cdots & x_{N+N_{IG}-(L+1)} & x_{N+N_{IG}-(L+2)} \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ x_{N+N_{IG}-(L+2)} & \cdots & \ddots & \ddots & x_1 \\ x_{L-1} & x_{L-2} & \cdots & x_1 & x_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_0 \\ h_1 \\ \vdots \\ h_{L-1} \\ h_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{N+N_{IG}-1} \\ e_{N+N_{IG}-2} \\ \vdots \\ e_1 \\ e_0 \end{bmatrix}$$

Como se ve, es una matriz $(N + N_{IG}, L)$.

La diversidad hace referencia en su forma más general a las posibles realizaciones distintas del canal con que se puede contar. Está relacionada con la matriz S y con las filas linealmente independientes de la misma, que marcan la independencia de unos símbolos con otros. La pérdida de diversidad es patente en ésta matriz que caracteriza los símbolos OFDM transmitidos.

A continuación se estudian separadamente los casos aplicados a la matriz tanto utilizando modulación CP-OFDM como ZP-OFDM.

- **CP-OFDM**

CP-OFDM es la forma de modulación empleada en los capítulos 3 y 4 en que se incluye un prefijo cíclico delante de cada símbolo OFDM.

Al introducir el Prefijo Cíclico, se observa que la mitad superior de la matriz S es igual a la mitad inferior de la matriz. Así pues, el rango de filas linealmente independientes será N. Esto es evidente puesto que el Prefijo Cíclico es un repetición de los últimos N_{cp} símbolos.

- **ZP-OFDM**

El sistema ZP-OFDM es análogo al sistema CP-OFDM. Todos los bloques de ambos sistemas son iguales, encontrándose la diferencia en el bloque que introduce el intervalo de guarda. En ZP-OFDM, los N_{IG} símbolos codificados del intervalo de guarda, no son lo últimos N_{cp} símbolos sino una ristra de N_{IG} ceros.

El efecto de introducir un intervalo de guarda todo-ceros en la matriz S, es el hecho de que las filas superiores no serán "iguales" a las filas inferiores de la matriz. Luego dentro de que no son tampoco linealmente independientes, sí pueden aportar determinada información sobre los trayectos del canal.

Luego queda demostrado que se pierde diversidad *multipath* al introducir el Prefijo Cíclico.

5.3. Simulaciones

El resultado obtenido en el apartado anterior, no significa que la técnica OFDM sea poco eficiente ni que ésta pérdida de diversidad suponga un inconveniente insalvable, puesto la norma IEEE802.11a e HIPERLAN/2 siguen siendo estándares enormemente extendidos gracias a todas las ventajas que presenta.

En éste apartado, se van a realizar simulaciones correspondientes a sistemas ZP-OFDM (Zero Padding OFDM) y CP-OFDM (Cyclic Prefix OFDM tal y como se ha estudiado hasta ahora). Vamos a comparar ambos sistemas para comprobar la pérdida de diversidad.

Las simulaciones se van a realizar suponiendo N=64 portadoras, intervalo de guarda de longitud IG=16 símbolos de la codificación y en un canal multitrayecto sist_mult como el descrito en el capítulo 3.

- **Sistema CP-OFDM**

El sistema CP-OFDM será el utilizado en los capítulos 3 y 4. La función que realiza este sistema es **sist_ofdm.m**.

La figura siguiente muestra un símbolo CP-OFDM igual que los empleados en las simulaciones de éste apartado.

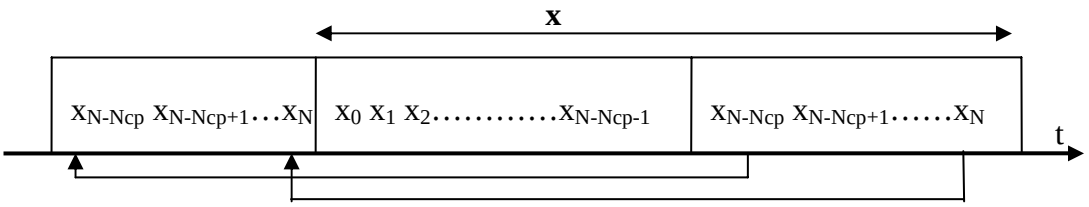


Figura 5.3. Símbolo CP-OFDM

- **Sistema ZP-OFDM**

La función que realiza este sistema es **sist_ofdm_ceros.m**, que llamará a la función **inser_ceros.m**. El receptor es en ambos casos el mismo.

La figura 5.4 un símbolo CP-OFDM como los utilizados en la simulación para su comparación con el símbolo de la figura5.3.

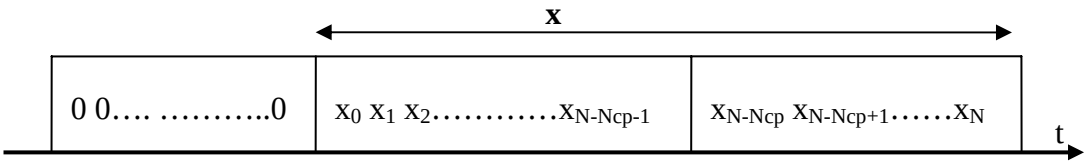


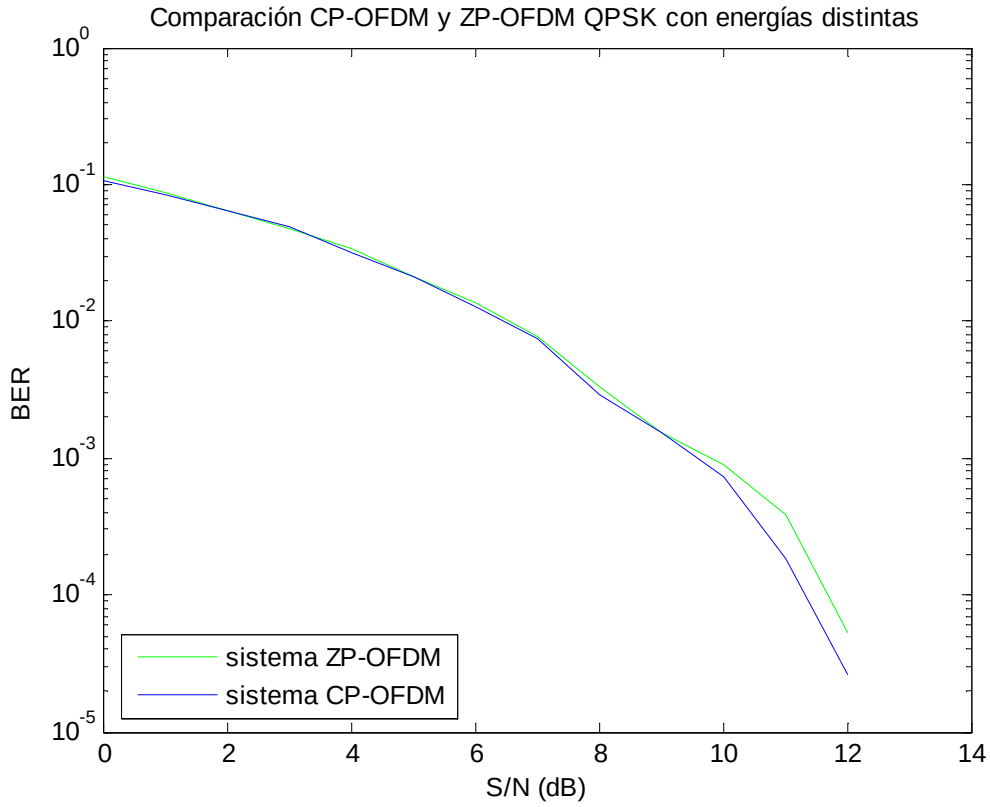
Figura 5.4. Símbolo ZP-OFDM

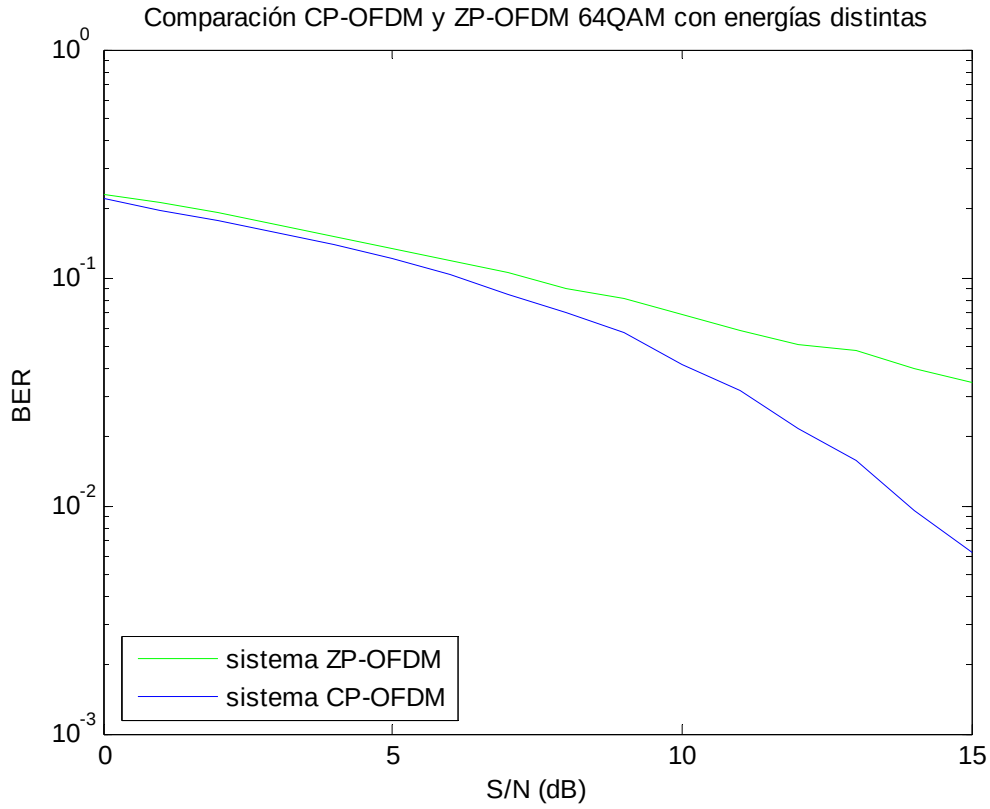
5.3.1. Sin igualar las energías de símbolo

Al introducir el Prefijo cíclico en el sistema CP-OFDM, estamos incrementando la energía de símbolo. Sin embargo, al implementar el sistema ZP-OFDM, la energía de cada símbolo es la misma que si no se estuviese introduciendo zero padding. Luego al realizar la comparación entre ambos, en realidad estamos comparando sistemas en que uno tiene mayor energía de símbolo (CP-OFDM) y por tanto será previsiblemente mejor frente a errores.

En éste apartado se realizan las simulaciones sin tener en cuenta éste aspecto. Luego:

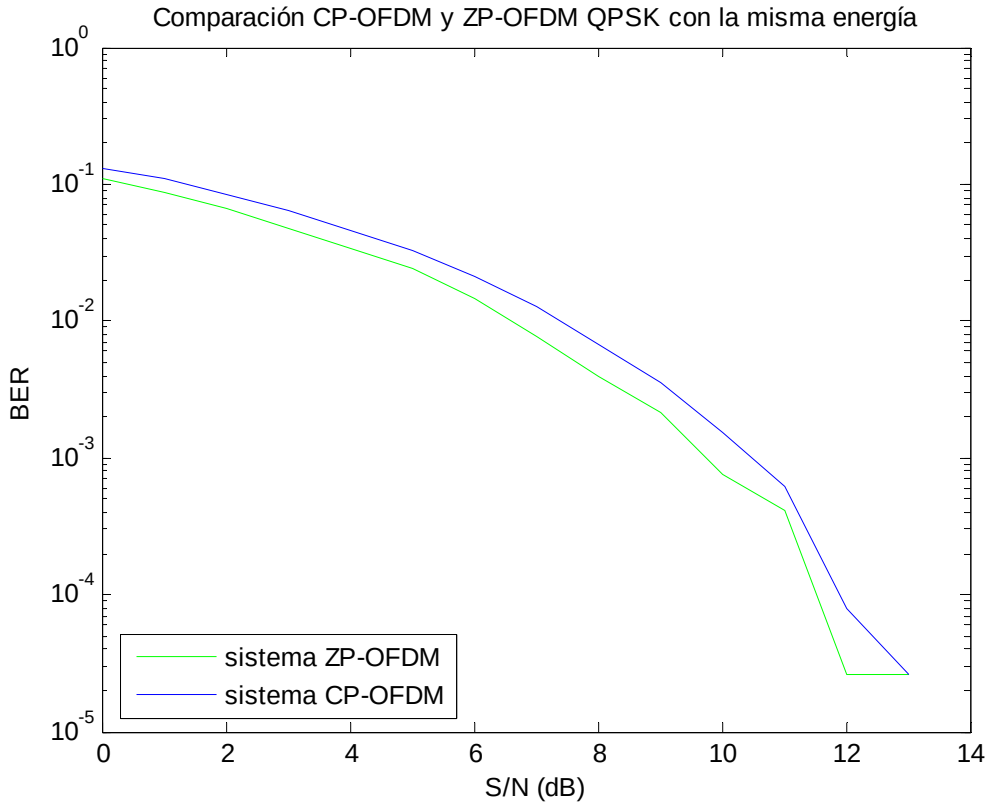
- **ZP-OFDM** trabaja con símbolos de energía E (energía de símbolo OFDM sin añadir intervalo de guarda).
- **CP-OFDM** trabaja con símbolos de energía $E_{cp\text{-}ofdm}=E_{cp}+E>E$.

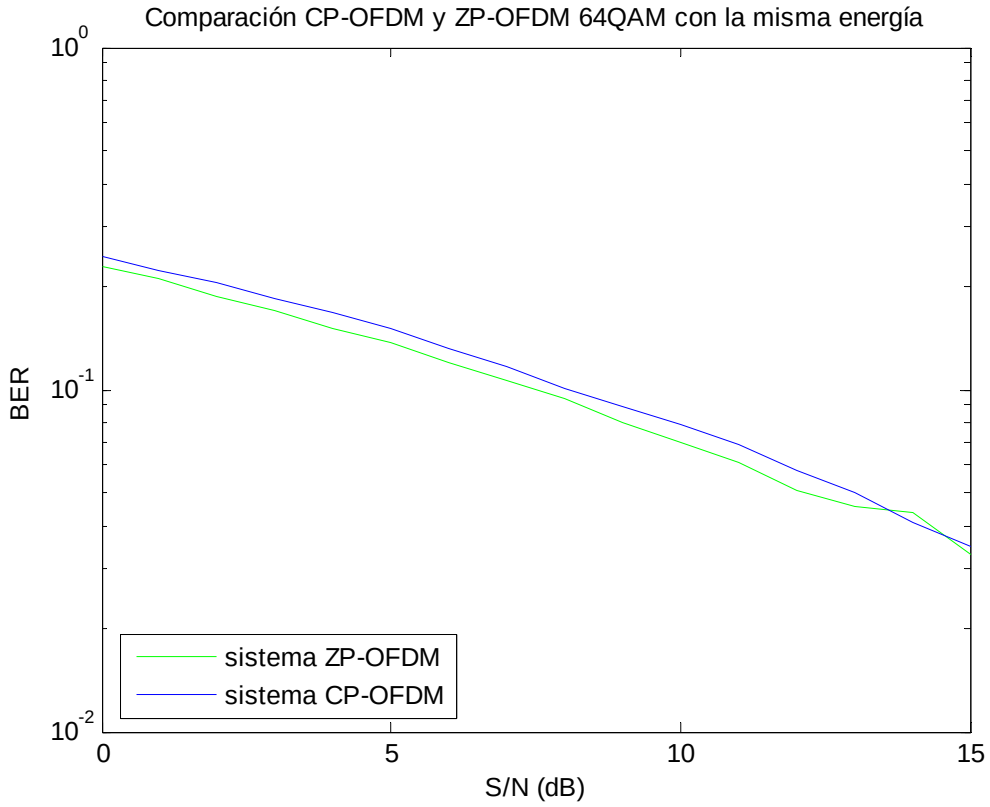




5.3.2. Igualando las energías de símbolo

En este apartado, se vuelven a realizar las simulaciones del apartado 5.3.1 pero equiparando la energía de símbolo CP-OFDM y ZP-OFDM. Se escalarán los símbolos de la codificación que constituyen un símbolo CP-OFDM, de forma que su energía sea la misma que la energía de un símbolo ZP-OFDM.


Comparación CP-OFDM y ZP-OFDM QPSK con la misma energía
BER
S/N (dB)
sistema ZP-OFDM
sistema CP-OFDM
10^0
10^-1
10^-2
10^-3
10^-4
10^-5
0
2
4
6
8
10
12
14



5.4. Conclusiones

Según los resultados obtenidos en las simulaciones, se deducen las siguientes conclusiones:

1.- En caso de no igualar las energías, siempre resulta mejor el sistema CP-OFDM frente a errores. Cuanto mayor es la cantidad de símbolos de la codificación (caso 64QAM frente a QPSK), mayor será la mejora que supone introducir Prefijo Cíclico en lugar de Zero Padding.

2.- Cuando se trabaja con constelación BPSK o QPSK, la mejora que supone introducir Prefijo Cíclico es tan pequeña que no merece la pena. Puesto que al introducir PC se necesita un hardware adicional específico que guarde los N_{cp} taps y los incluya al principio.

3.- Al igualar las energías, efectivamente ZP-OFDM es mejor que CP-OFDM. Esto puede deberse a dos razones:

- Efectivamente queda reflejada la pérdida de diversidad demostrada en el apartado 5.2.
- O el sistema ZP-OFDM resulta mejor puesto la energía de cada tap de los N que llevan información será mayor. Es decir, en el sistema ZP-OFDM la cantidad E de energía se reparte entre los N taps de información. Sin embargo en el sistema CP-OFDM, la energía E se reparte entre $N+N_{cp}$ taps que constituyen un símbolo OFDM