

# 4

## Simulaciones



## 4.1. Introducción

El objetivo de este capítulo es estudiar las mejoras que se producen en la tasa de error de bit al introducir un codificador o al usar una modulación u otra. Para ello, como explicamos en el capítulo 3 vamos a emplear Matlab, donde crearemos unos archivos que simularan los distintos sistemas de comunicaciones.

La estructura del capítulo es la siguiente, primero simularemos varios sistemas, sin ningún codificador para ver la mejora que produce usar un tipo de modulación y las consecuencias de usar una modulación con una constelación mayor.

A continuación, para una modulación dada, con un  $M$ , orden de la modulación también fijo, estudiaremos el comportamiento de diversos codificadores ( Hamming (7,4), Hamming(15,11) ...). Para cada caso, compararemos cuando es más conveniente usar uno u otro.

Finalmente, fijaremos los requisitos del sistema, es decir fijaremos el ancho de banda y el régimen binario. Recordemos, como ya vimos en 2.3.1 que introducir codificación afecta a estos parámetros. El objetivo es analizar para un sistema con recursos limitados, que estrategia debemos seguir para reducir la *BER*.

Los ficheros empleados en la simulación pueden encontrarse en los anexos.

## 4.2. Modulación y BER

Vimos cuando hablábamos de las modulaciones en 2.2, que estas influyen de distinta manera en la *BER* para los distintos niveles de  $E_b/N_0$ . Vamos a simular un sistema como el que se representa en la figura 4.1 con objeto a generar unas gráficas de la tasa de error en función a la relación energía de bit-nivel de ruido lo más parecida a las de los libros.

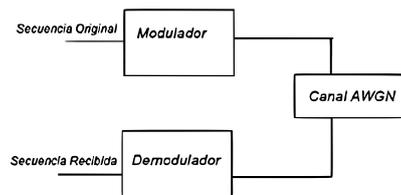


Figura 4.1: Esquema del sistema usado para la simulación de la BER para las distintas modulaciones

Analizaremos para cada tipo de modulación los resultados, y compararemos como en 2.2.3 los distintos tipos de modulaciones, comparando la *BER* para un  $M$  determinado y un  $E_b/N_0$  determinado.

#### 4.2.1. Simulación Sistemas con Modulaciones PSK sin codificación

Los parámetros de esta simulación viene dados el la tabla 4.1

<b>Bits transmitidos</b>	5 $10^6$
<b>Tipo de modulación</b>	PSK
<b>Orden de la modulación</b>	2 4 16 32
<b>Codificador</b>	Sin codificador
<b>Pulso conformador</b>	Pulso rectangular
$E_b/N_0$	[-5:10]

Cuadro 4.1: Parámetros simulación PSK

En la figura 4.2 observamos el resultado de la simulación. En la tabla 4.2 se muestran algunos valores de la *BER* para las distintas modulaciones y para varios valores de  $E_b/N_0$ .

$E_b/N_0$ (dB)	<b>2PSK</b>	<b>4PSK</b>	<b>16PSK</b>	<b>32PSK</b>
-5	0.2129	0.2134	0.2855	0.3143
-2	0.1306	0.1305	0.2187	0.2607
0	0.0786	0.0787	0.1746	0.2250
2	0.0375	0.0376	0.1338	0.1891
5	0.0060	0.0059	0.0828	0.1367
7	0.0008	0.0008	0.0543	0.1056
10	0.0000	0.0000	0.0203	0.0661

Cuadro 4.2: *BER* simulación PSK

Si analizamos la figura o la tabla, podemos observar que obtenemos mejor tasa de error cuánto menor sea el orden de la modulación  $M$ . Sin embargo cuánto menor sea el orden,

mayor será el ancho de banda por lo que dependiendo de las características de nuestro sistema, limitación de ancho de banda y  $E_b/N_0$  escogeremos una u otra modulación.

Podemos observar que aproximadamente a partir de  $E_b/N_0 = 0$ , la  $BER$  para  $M = 16$  y  $M = 32$  difiere más de los valores para  $M = 2$  y  $M = 4$ .

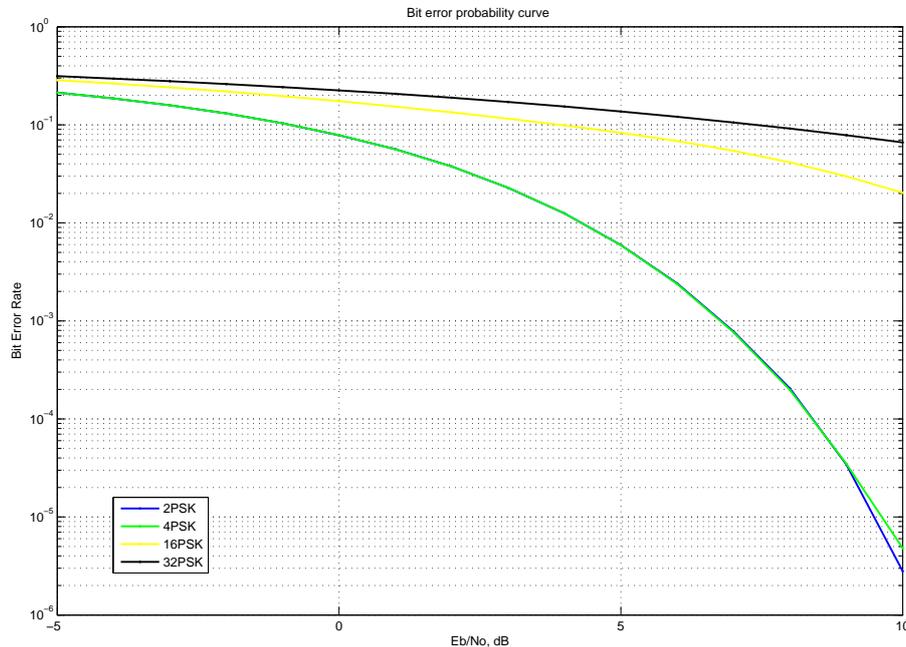


Figura 4.2: BER Simulada PSK

#### 4.2.2. Simulación Sistemas con Modulaciones QAM sin codificación

Las características de la simulación son:

<b>Bits transmitidos</b>	$5 \cdot 10^6$
<b>Tipo de modulación</b>	QAM
<b>Orden de la modulación</b>	4 16 32
<b>Codificador</b>	Sin codificador
<b>Pulso conformador</b>	Pulso rectangular
$E_b/N_0$	[-5:10]

Cuadro 4.3: Parámetros simulación QAM

En la figura 4.3 observamos el resultado de la simulación. En la tabla 4.4 se muestran algunos valores de la  $BER$  para las distintas modulaciones y para varios valores de  $E_b/N_0$ .

Si analizamos la figura o la tabla, podemos observar que obtenemos mejor tasa de error cuánto menor sea el orden de la modulación  $M$ . Sin embargo cuánto menor sea el orden,

$E_b/N_0$ (dB)	4QAM	16QAM	32QAM
-5	0.2132	0.2620	0.2897
-2	0.1307	0.1874	0.2238
0	0.0789	0.1408	0.1801
2	0.0375	0.0977	0.1375
5	0.0060	0.0420	0.0771
7	0.0008	0.0169	0.0442
10	0.0000	0.0017	0.0096

Cuadro 4.4: BER simulación QAM

mayor será el ancho de banda por lo que dependiendo de las características de nuestro sistema, limitación de ancho de banda y  $E_b/N_0$  escogeremos una u otra modulación.

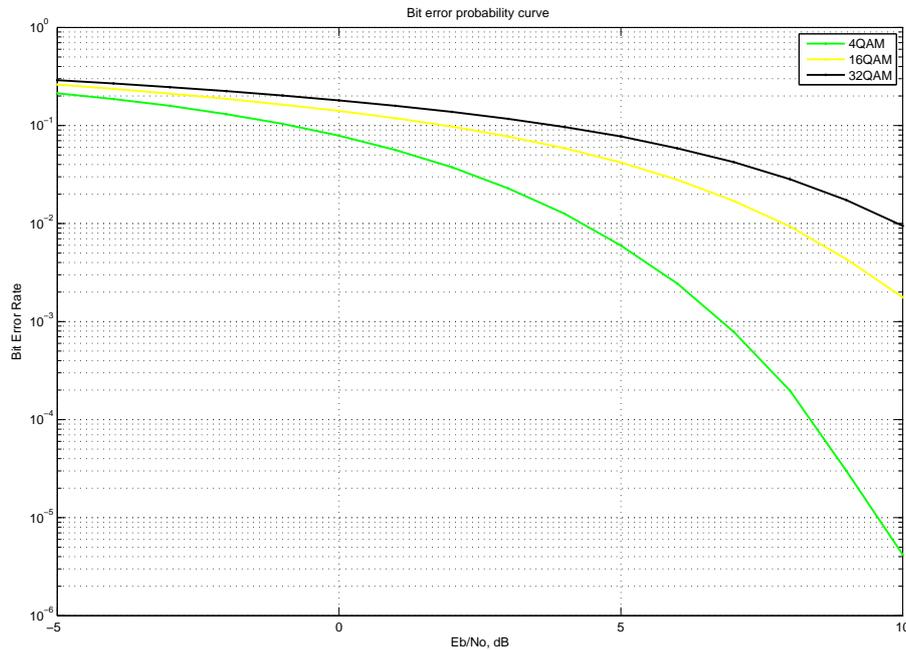


Figura 4.3: BER Simulada QAM

### 4.2.3. Comparación simulaciones Modulación

Como veíamos en 2.2.3 para  $M = 4$  la BER de una y otra modulación son parecidas, si vemos la figura 4.4 se superponen. Para  $M > 4$  ofrece mejores prestaciones la modulación QAM como ya habíamos visto.

## 4.3. Codificación de señales MPSK

Vamos a simular distintos sistemas con modulaciones PSK, para ver el rendimiento que ofrecen distintos códigos a cada una de las modulaciones.

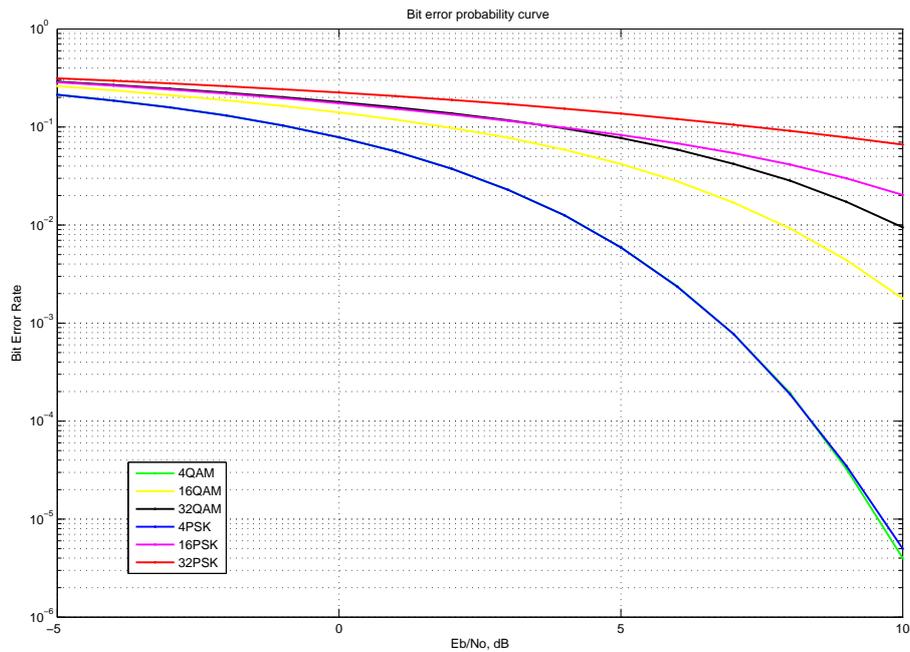


Figura 4.4: BER Simulada PSK vs QAM

### 4.3.1. Simulación Sistema 2PSK

Los parámetros de la simulación se encuentran en la tabla 4.5. En la figura 4.5 y en la tabla 4.6 podemos observar los resultados de la simulación<sup>1</sup>.

<b>Bits transmitidos</b>	$5 \cdot 10^6$
<b>Tipo de modulación</b>	PSK
<b>Orden de la modulación</b>	2
<b>Codificador</b>	Los comentados en 3.3.2 con tasa 1/2
<b>Pulso conformador</b>	Pulso rectangular
$E_b/N_0$	[-5:10]

Cuadro 4.5: Parámetros simulación 2PSK

Si analizamos los resultados, observamos que para niveles de ruido altos, los códigos convolucionales son peores que los códigos de Hamming, al tener asociadas *BER* mayores, e incluso peores que no poner codificador. Sin embargo, para valores bajo de ruido, en torno a 5 dB de relación  $E_b/N_0$  proporcionan una mejora significativa de la tasa de error.

Si comparamos los códigos convolucionales, a medida que  $K$  crece, corta más tarde con la curva sin codificar, sin embargo, una vez corta, la BER es mucho menos para  $K$  mayores.

En los códigos de Hamming, para  $n = 7$  los valores de la BER son peores, y decrecen conforme  $n$  aumenta.

<sup>1</sup>Siendo Conv1 el codificador convolucional de  $K = 7$ , Conv2 el de  $K = 9$  y Conv3 el de  $K = 5$

$E_b/N_0$ (dB)	Sin codificar	H(7,4)	H(15,11)	(31,26)	Conv1	Conv2	Conv3
-5	0.2132	0.2912	0.2761	0.2496	0.4978	0.4981	0.4780
-2	0.1305	0.1934	0.1919	0.1721	0.4760	0.4844	0.4151
0	0.0787	0.1189	0.1217	0.1153	0.3748	0.4089	0.2908
2	0.0375	0.0550	0.0537	0.0556	0.1231	0.1261	0.1059
5	0.0060	0.0068	0.0045	0.0043	0.0006	0.0002	0.0022
7	0.0008	0.0006	0.0002	0.0002	0.000	0	0.0000
10	0.0000	0	0	0	0	0	0

Cuadro 4.6: BER simulación 2PSK

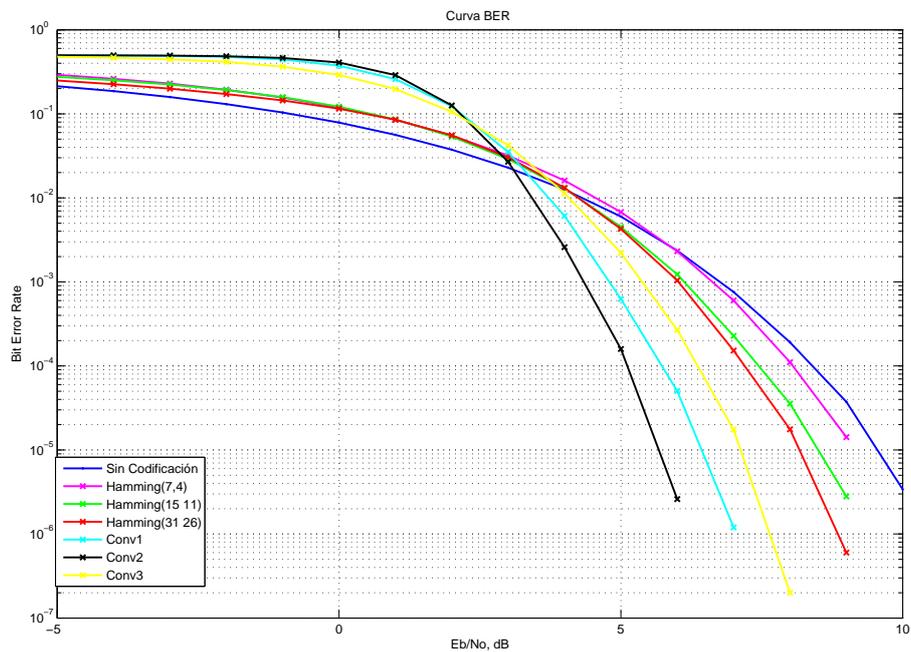


Figura 4.5: BER Simulada 2PSK

### 4.3.2. Simulación Sistema 4PSK

Los parámetros de la simulación se encuentran en la tabla 4.7. En la figura 4.6 y en la tabla 4.8 podemos observar los resultados de la simulación.

<b>Bits transmitidos</b>	$5 \cdot 10^6$
<b>Tipo de modulación</b>	PSK
<b>Orden de la modulación</b>	4
<b>Codificador</b>	Los comentados en 3.3.2 con tasas 1/2 y 1/3
<b>Pulso conformador</b>	Pulso rectangular
$E_b/N_0$	[-5:10]

Cuadro 4.7: Parámetros simulación 4PSK

Si analizamos los resultados, observamos que ocurre lo mismo que en la simulación anterior.

$E_b/N_0$ (dB)	Sin codificar	H(7,4)	H(15,11)	(31,26)	Conv1	Conv2	Conv3
-5	0.2131	0.2912	0.2764	0.2499	0.4981	0.4980	0.4779
-2	0.1305	0.1932	0.1923	0.1727	0.4754	0.4843	0.4141
0	0.0785	0.1190	0.1221	0.1150	0.3747	0.4083	0.2911
2	0.0375	0.0550	0.0538	0.0552	0.1227	0.1251	0.1058
5	0.0060	0.0068	0.0046	0.0042	0.0006	0.0001	0.0022
7	0.0008	0.0006	0.0002	0.0001	0	0	0.0000
10	0.0000	0	0	0	0	0	0

Cuadro 4.8: BER simulación 4PSK

Ahora vamos a comparar el rendimiento de distintos códigos convolucionales, para ver como influye la tasa de código. Vamos a simular sistemas con  $Coderate = 1/2$  y  $Coderate = 1/3$ . En la tabla 4.9 se muestra la BER de los códigos convolucionales de tasa 1/3 ya que los valores para los de tasa 1/2 pueden verse en 4.8.

$E_b/N_0$ (dB)	Conv2 <sub>1</sub>	Conv2 <sub>2</sub>	Conv2 <sub>3</sub>
-5	0.4260	0.4696	0.4917
-2	0.2594	0.3144	0.3760
0	0.0840	0.0837	0.0893
2	0.0078	0.0034	0.0015
5	0.0000	0.	0.0000
7	0	0	0
10	0	0	0

Cuadro 4.9: BER simulación 4PSK convolucionales

Podemos observar que el aumento de la tasa de código en los convolucionales mejora la BER, ya que estamos aumentando la redundancia, por lo que aumentamos el número de bits transmitidos.

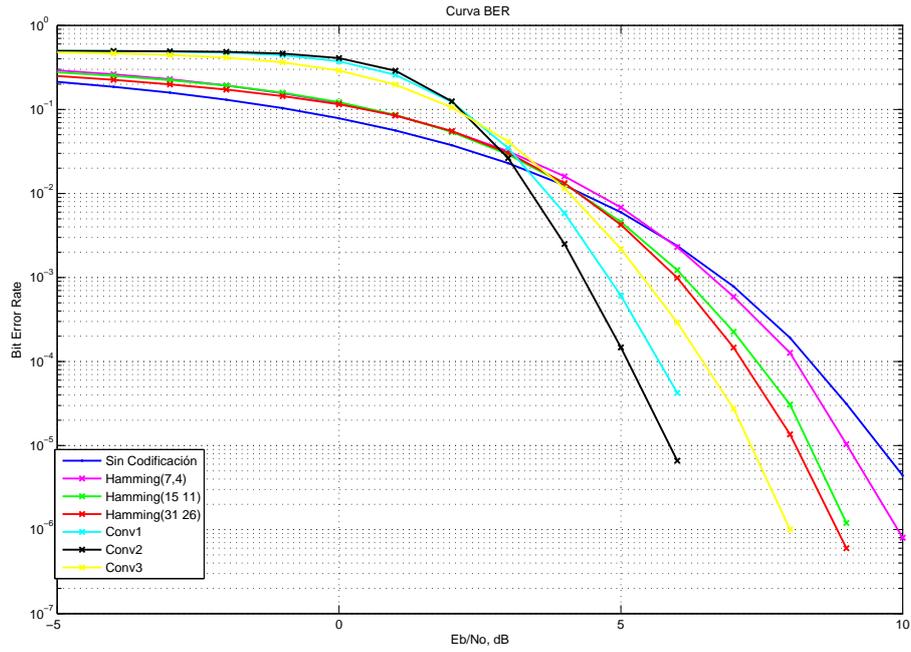


Figura 4.6: BER Simulada 4PSK

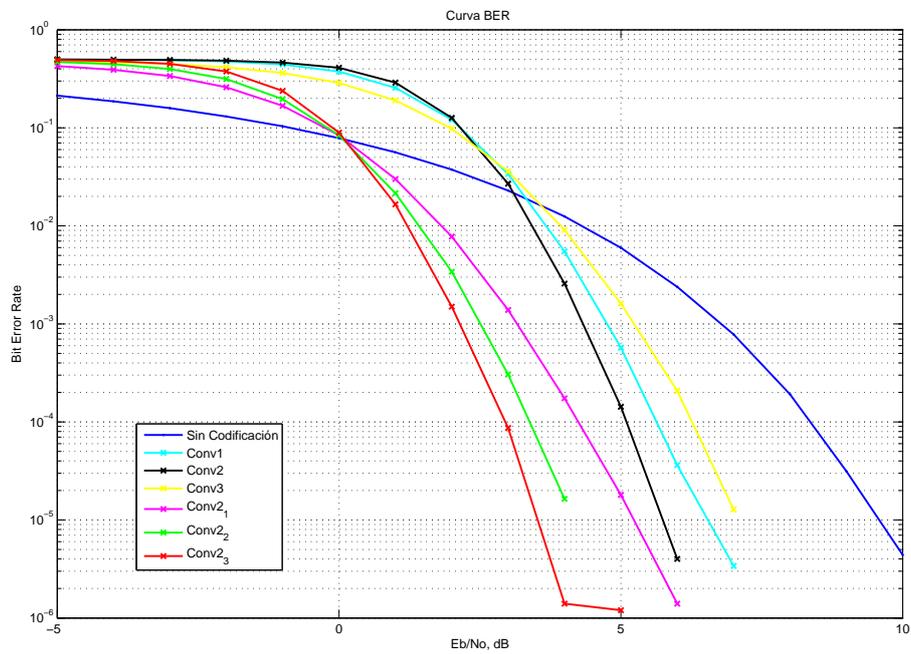


Figura 4.7: BER Convolucionales Simulada 4PSK

### 4.3.3. Simulación Sistema 16PSK

Los parámetros de la simulación se encuentran en la tabla 4.10. En la figura 4.8 y en la tabla 4.11 podemos observar los resultados de la simulación.

<b>Bits transmitidos</b>	$5 \cdot 10^6$
<b>Tipo de modulación</b>	PSK
<b>Orden de la modulación</b>	16
<b>Codificador</b>	Los comentados en 3.3.2 con tasa 1/2 y 1/3
<b>Pulso conformador</b>	Pulso rectangular
$E_b/N_0$	[-5:10]

Cuadro 4.10: Parámetros simulación 16PSK

$E_b/N_0$ (dB)	Sin codificar	H(7,4)	(31,26)	Conv1	Conv2	Conv3
-5	0.2853	0.2595	0.3136	0.4996	0.4995	0.4958
-2	0.2189	0.2943	0.2528	0.4987	0.4982	0.4872
0	0.1744	0.2369	0.2104	0.4944	0.4947	0.4808
2	0.1338	0.1735	0.1701	0.4746	0.4818	0.4248
5	0.0828	0.0848	0.1142	0.3061	0.3438	0.2431
7	0.0542	0.0442	0.0750	0.0908	0.0880	0.0883
10	0.0203	0.0116	0.0216	0.0017	0.0006	0.0051

Cuadro 4.11: BER simulación 16PSK

Ahora vamos a comparar el rendimiento de distintos códigos convolucionales, para ver como influye la tasa de código. Vamos a simular sistemas con  $Coderate = 1/2$  y  $Coderate = 1/3$ . En la tabla 4.12 se muestra la BER de los códigos convolucionales de tasa 1/3 ya que los valores para los de tasa 1/2 pueden verse en 4.11.

$E_b/N_0$ (dB)	Conv2 <sub>1</sub>	Conv2 <sub>2</sub>	Conv2 <sub>3</sub>
-5	0.4743	0.4945	0.4994
-2	0.4340	0.4751	0.4938
0	0.3593	0.4224	0.4668
2	0.2136	0.2595	0.3188
5	0.0200	0.0129	0.0089
7	0.0012	0.0003	0.0001
10	0.0000	0.0000	0

Cuadro 4.12: BER simulación 16PSK convolucionales

Podemos observar que el aumento de la tasa de código en los convolucionales mejora la BER, ya que estamos aumentando la redundancia, por lo que aumentamos el número de bits transmitidos.

Si comparamos, las tres simulaciones para sistemas con modulaciones *PSK*, observamos que la tasa de error para un mismo  $E_b/N_0$  empeora conforme  $M$  crece. Las simulaciones se ven afectadas por los códigos de forma parecida, para niveles negativos y bajos de  $E_b/N_0$ , los códigos convolucionales producen numerosos errores, sin embargo a partir

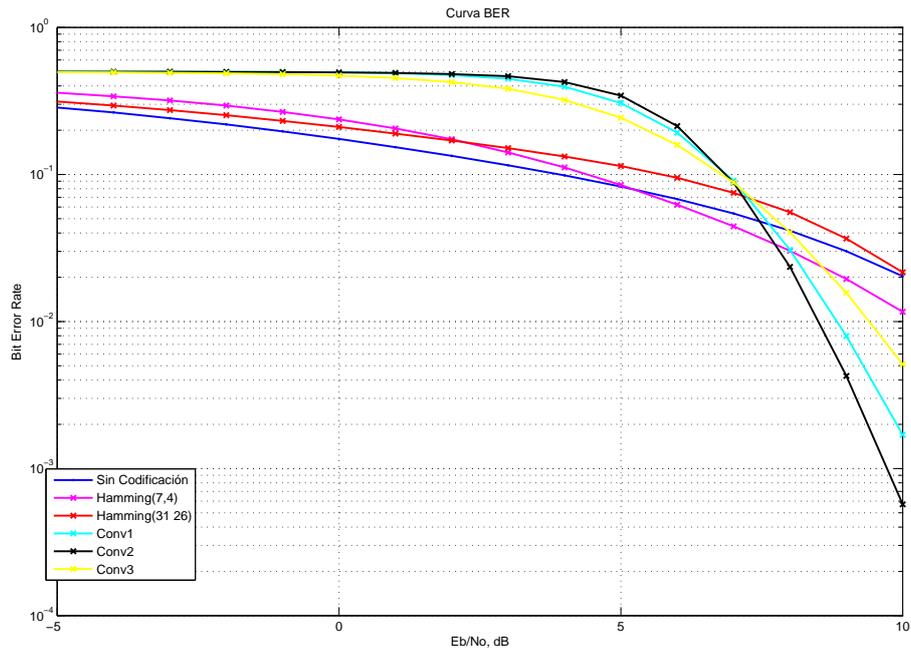


Figura 4.8: BER Simulada 16PSK

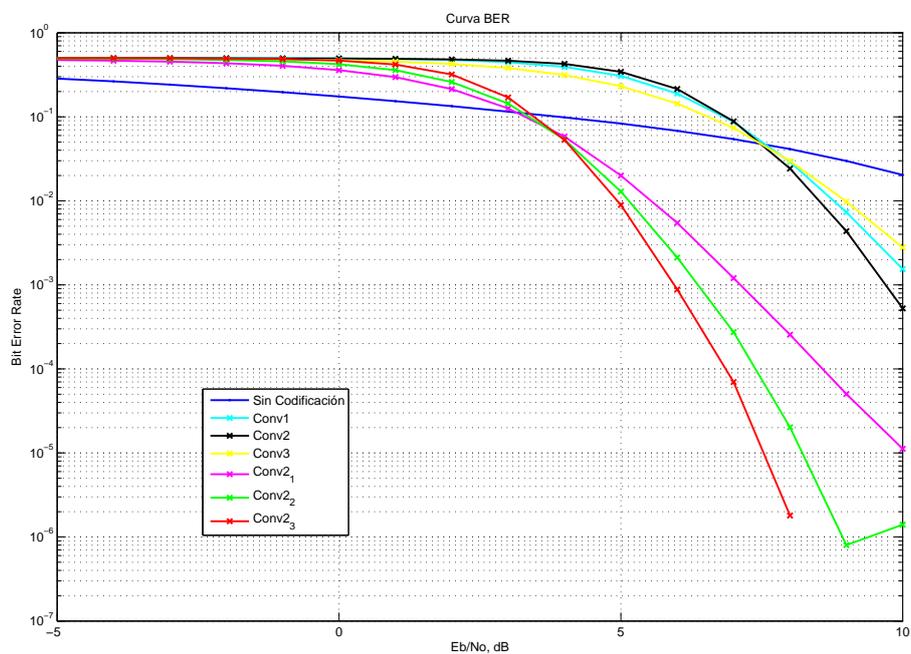


Figura 4.9: BER Convolucionales Simulada 16PSK

de un cierto valor, mejoran rápidamente la *BER*. Los códigos de Hamming, se mantienen más cercanos a la curva resultante del sistema sin codificador, dando lugar a curvas inicialmente peores que la del sistema sin codificar, y progresivamente mejorando.

## 4.4. Codificación de señales MQAM

### 4.4.1. Simulación Sistema 4QAM

Los parámetros de la simulación se encuentran en la tabla 4.13. En la figura 4.10 y en la tabla 4.14 podemos observar los resultados de la simulación.

<b>Bits transmitidos</b>	5 $10^6$
<b>Tipo de modulación</b>	QAM
<b>Orden de la modulación</b>	4
<b>Codificador</b>	Los comentados en 3.3.2 con tasa 1/2 y 1/3
<b>Pulso conformador</b>	Pulso rectangular
$E_b/N_0$	[-5:10]

Cuadro 4.13: Parámetros simulación 4QAM

$E_b/N_0$ (dB)	Sin codificar	H(7,4)	H(15,11)	(31,26)	Conv1	Conv2	Conv3
-5	0.2133	0.2913	0.2765	0.2496	0.4977	0.4980	0.4781
-2	0.1304	0.1932	0.1921	0.1725	0.4751	0.4839	0.4138
0	0.0786	0.1191	0.1217	0.1150	0.3758	0.4103	0.2911
2	0.0374	0.0550	0.0539	0.0556	0.1222	0.1260	0.1061
5	0.0059	0.0068	0.0046	0.0043	0.0006	0.0001	0.0022
7	0.0008	0.0006	0.0002	0.0002	0.0000	0	0.0000
10	0.0000	0.0000	0	0	0	0	0

Cuadro 4.14: *BER* simulación 4QAM

Ahora vamos a comparar el rendimiento de distintos códigos convolucionales, para ver como influye la tasa de código. Vamos a simular sistemas con *Coderate* = 1/2 y *Coderate* = 1/3. En la tabla 4.15 se muestra la *BER* de los códigos convolucionales de tasa 1/3 ya que los valores para los de tasa 1/2 pueden verse en 4.14.

$E_b/N_0$ (dB)	Conv2 <sub>1</sub>	Conv2 <sub>2</sub>	Conv2 <sub>3</sub>
-5	0.4262	0.4691	0.4921
-2	0.2603	0.3140	0.3779
0	0.0838	0.0836	0.0895
2	0.0077	0.0033	0.0016
5	0.0000	0.0000	0
7	0	0	0
10	0	0	0

Cuadro 4.15: *BER* simulación 4QAM convolucionales

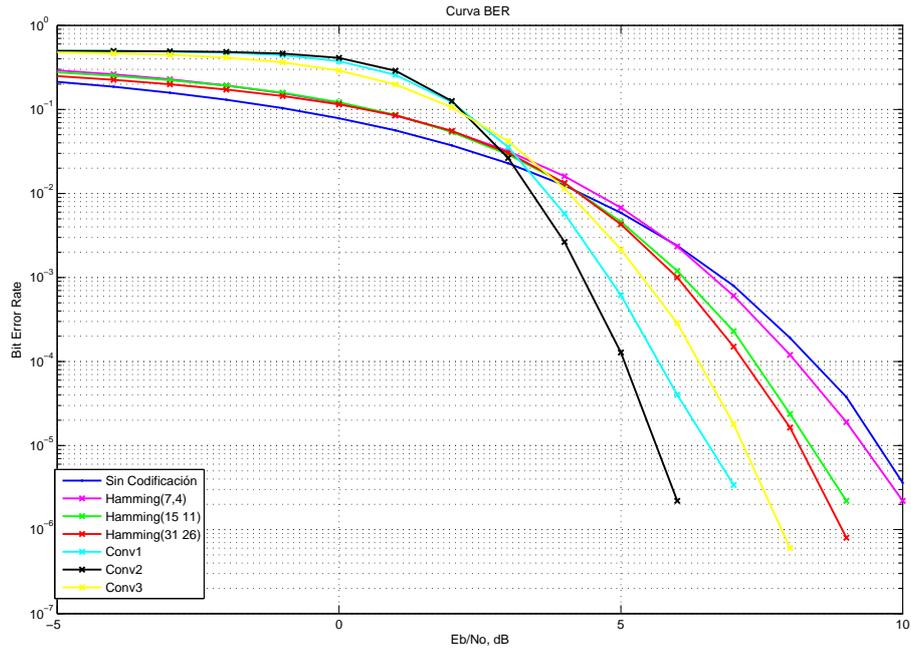


Figura 4.10: BER Simulada 4QAM

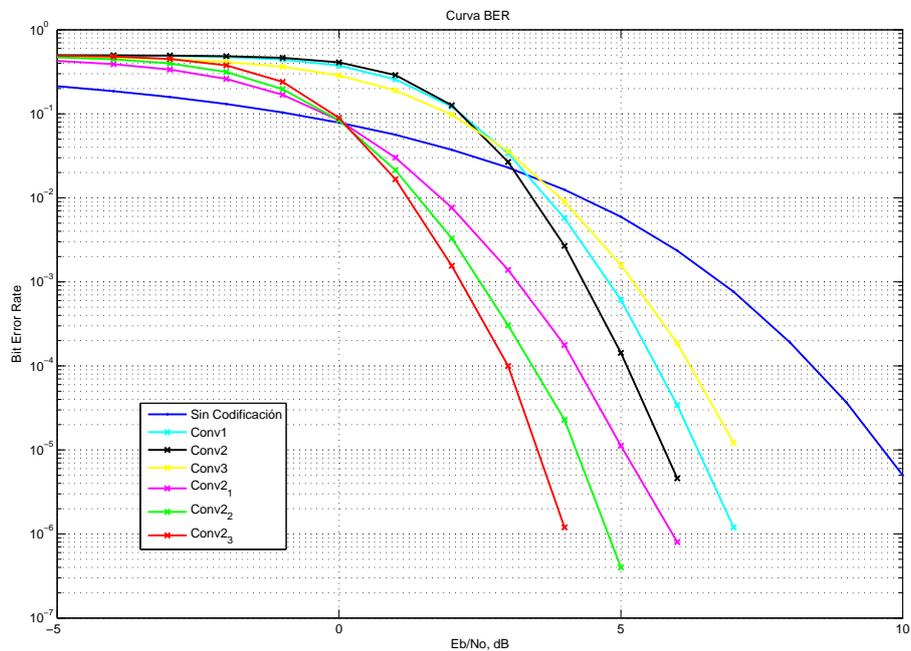


Figura 4.11: BER Convolucionales Simulada 4QAM

#### 4.4.2. Simulación Sistema 16QAM

Los parámetros de la simulación se encuentran en la tabla 4.16. En la figura 4.12 y en la tabla 4.14 podemos observar los resultados de la simulación.

<b>Bits transmitidos</b>	$5 \cdot 10^6$
<b>Tipo de modulación</b>	QAM
<b>Orden de la modulación</b>	16
<b>Codificador</b>	Los comentados en 3.3.2 con tasa 1/2 y 1/3
<b>Pulso conformador</b>	Pulso rectangular
$E_b/N_0$	[-5:10]

Cuadro 4.16: Parámetros simulación 16QAM

$E_b/N_0$ (dB)	Sin codificar	H(7,4)	(31,26)	Conv1	Conv2	Conv3
-5	0.2622	0.3410	0.2947	0.4992	0.4984	0.4916
-2	0.1873	0.2592	0.2243	0.4955	0.4964	0.4743
0	0.1408	0.1925	0.1791	0.4816	0.4881	0.4388
2	0.0977	0.1269	0.1342	0.4143	0.4435	0.3423
5	0.0417	0.0473	0.0596	0.0968	0.0922	0.0892
7	0.0170	0.0162	0.0187	0.0060	0.0024	0.0113
10	0.0018	0.0011	0.0006	0.0000	0.0000	0.0000

Cuadro 4.17: BER simulación 16QAM

Ahora vamos a comparar el rendimiento de distintos códigos convolucionales, para ver como influye la tasa de código. Vamos a simular sistemas con  $Coderate = 1/2$  y  $Coderate = 1/3$ . En la tabla 4.18 se muestra la BER de los códigos convolucionales de tasa 1/3 ya que los valores para los de tasa 1/2 pueden verse en 4.17.

$E_b/N_0$ (dB)	Conv2 <sub>1</sub>	Conv2 <sub>2</sub>	Conv2 <sub>3</sub>
-5	0.4612	0.4872	0.4980
-2	0.3935	0.4468	0.4813
0	0.2664	0.3243	0.3858
2	0.0929	0.0967	0.1098
5	0.0029	0.0009	0.0003
7	0.0001	0.0000	0
10	0	0	0

Cuadro 4.18: BER simulación 16QAM convolucionales

En las modulaciones QAM, ocurre algo parecido a las PSK, los códigos de Hamming producen leves mejoras a partir de un valor y los convolucionales inicialmente, es decir para valores alto de ruido en comparación a la energía de la señal, resultan peores incluso que no codificar, sin embargo a partir de un cierto valor de esta relación entre la señal y el ruido, producen una mejora en la BER significativa.

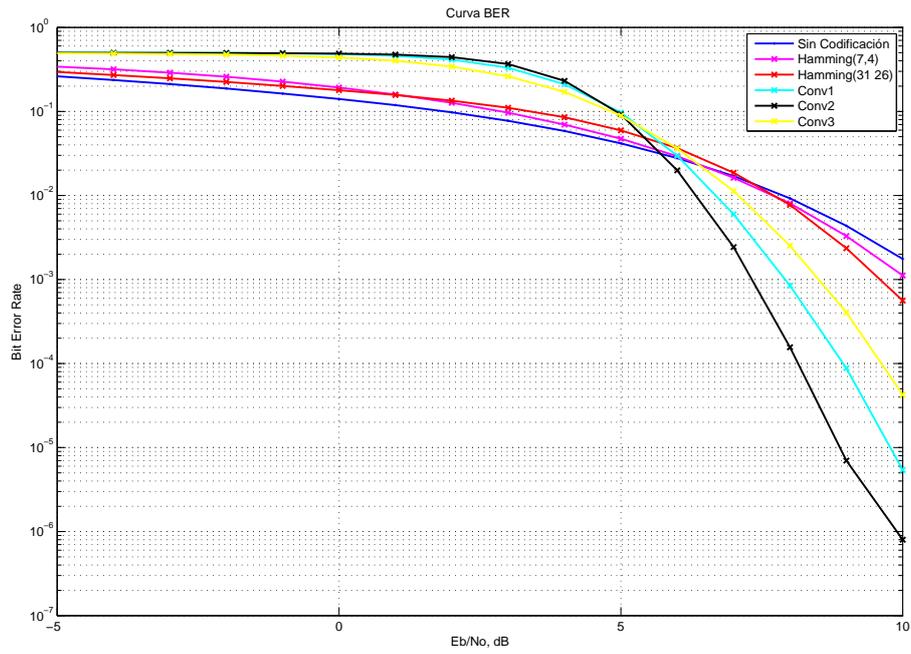


Figura 4.12: BER Simulada 16QAM

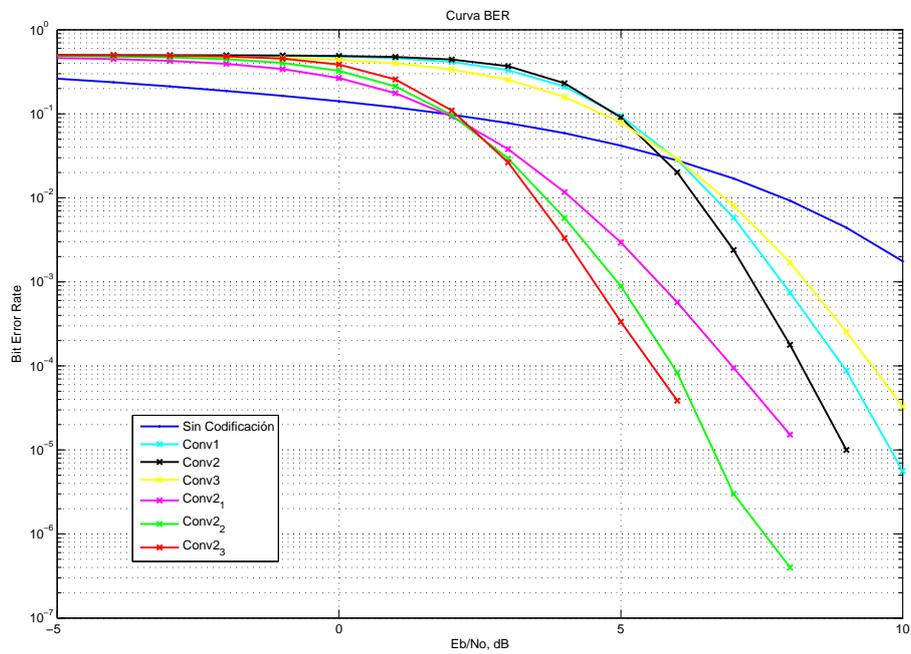


Figura 4.13: BER Convolucionales Simulada 16QAM

## 4.5. Simulación con restricción de ancho de banda y régimen binario constante

En esta sección, vamos a realizar simulaciones en las que vamos a mantener el ancho de banda  $BW$  constante. Si nos fijamos en la ecuación (4.1), esta depende de la duración del pulso  $T$ , la tasa del código  $r$  y del número de símbolos de la modulación  $M$ .

$$BW = 1/T_s = \frac{1}{rT \log_2(M)} \quad (4.1)$$

Para mantener  $BW$  constante, teniendo en cuenta que  $T$  es constante también, tendremos que hacer que el producto  $r \log_2(M)$  sea constante, y en nuestro caso igual a uno. Por ejemplo para una  $4QAM$ , donde  $M = 4$  tenemos que elegir codificadores con  $r = 1/2$ . Los codificadores empleados vienen reflejados en la tabla 4.19. Estos códigos, han sido consultados en [4].

Nombre	coderate	K	codegen	M
<i>Conv1</i>	1/2	5	[23 35]	4
<i>Conv2</i>	1/2	7	[171 133]	4
<i>Conv3</i>	1/2	9	[561 753]	4
<i>Conv2<sub>1</sub></i>	1/4	5	[25 27 33 37]	16
<i>Conv2<sub>2</sub></i>	1/4	7	[135 135 147 133]	16
<i>Conv2<sub>3</sub></i>	1/4	9	[463 535 733 745]	16
<i>Conv3<sub>1</sub></i>	1/5	5	[37 27 33 25 35]	32
<i>Conv3<sub>2</sub></i>	1/5	7	[176 131 135 135 147]	32

Cuadro 4.19: Parámetros códigos simulación Ancho de banda constante y  $M$

### 4.5.1. Sistemas con ancho de banda constante para modulaciones PSK

Empleando los parámetros de la tabla 4.19, para modulaciones PSK obtenemos las curvas de la figura 4.14 y los valores de la tabla 4.20 y 4.21.

$E_b/N_0$ (dB)	<i>Conv1</i> $M = 4$	<i>Conv2</i> $M = 4$	<i>Conv3</i> $M = 4$	<i>Conv2<sub>1</sub></i> $M = 16$
-5	0.4783	0.4978	0.4981	0.4769
-2	0.4148	0.4756	0.4839	0.4464
0	0.2885	0.3754	0.4094	0.3978
2	0.1009	0.1215	0.1263	0.2978
5	0.0018	0.0005	0.0001	0.0650
7	0.0000	0.0000	0	0.0054
10	0	0	0	0.0000

Cuadro 4.20:  $BER$  Simulada Ancho de Banda constante PSK II

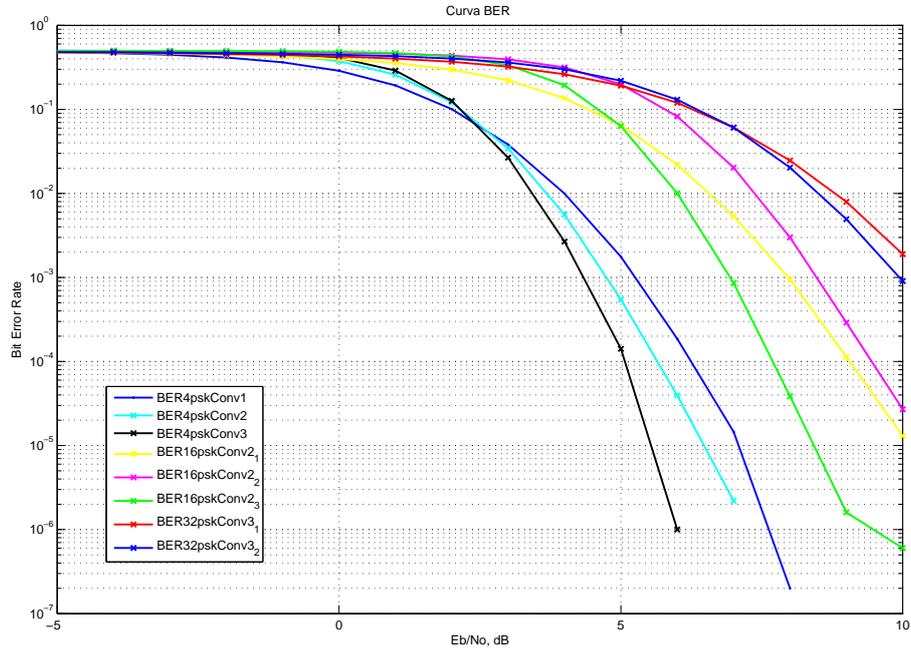


Figura 4.14: *BER* Simulada Ancho de Banda constante PSK

$E_b/N_0$ (dB)	$Conv2_2$ $M = 16$	$Conv2_3$ $M = 16$	$Conv3_1$ $M = 32$
-5	0.4934	0.4996	0.4781
-2	0.4851	0.4962	0.4565
0	0.4727	0.4851	0.4270
2	0.4370	0.4270	0.3691
5	0.1990	0.0633	0.1918
7	0.0203	0.0009	0.0607
10	0.0000	0.0000	0.0019

Cuadro 4.21: *BER* Simulada Ancho de Banda constante PSK II

### 4.5.2. Sistemas con ancho de banda constante para modulaciones QAM

De la misma manera que en , empleamos los codificadores cuyos parámetros vienen determinados en la tabla 4.19. Las modulaciones en este caso son QAM. Los resultados de la simulación pueden observarse en la figura 4.15 y los valores de la tabla 4.22 y 4.23.

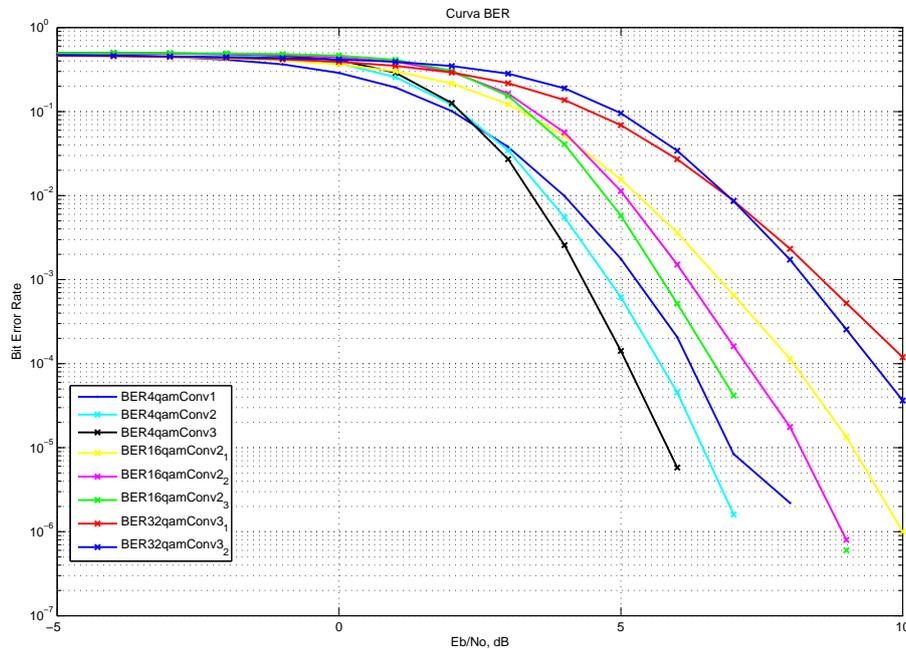


Figura 4.15: BER Simulada Ancho de Banda constante QAM

$E_b/N_0$ (dB)	<i>Conv1</i> $M = 4$	<i>Conv2</i> $M = 4$	<i>Conv3</i> $M = 4$	<i>Conv2</i> <sub>1</sub> $M = 16$
-5	0.4780	0.4985	0.4979	0.4593
-2	0.4149	0.4747	0.4842	0.4284
0	0.2886	0.3748	0.4099	0.3645
2	0.1013	0.1207	0.1263	0.2157
5	0.0018	0.0006	0.0001	0.0155
7	0.0000	0.0000	0	0.0007
10	0	0	0.0000	0

Cuadro 4.22: BER Simulada Ancho de Banda constante QAM II

Si observamos los resultados de esta sección como de la anterior, podemos afirmar, que para un ancho de banda constante, para valores de  $E_b/N_0$  entre -5 dB y 3 dB aproximadamente, da mejores resultados el código *Conv1* para una modulación con  $M = 4$  y tasa de código  $r = 1/2$  y  $K = 5$ . A partir de 3 dB, la modulación y código que proporcionan mejores valores de la tasa de error, son:  $M = 4$ ,  $K = 9$  y  $r = 1/2$ , nombrado en la tabla 4.19 como *Conv3*.

$E_b/N_0$ (dB)	$Conv2_2$ $M = 16$	$Conv2_3$ $M = 16$	$Conv3_1$ $M = 32$	$Conv3_2$ $M = 32$
-5	0.4950	0.4981	0.4630	0.4662
-2	0.4814	0.4909	0.4358	0.4444
0	0.4435	0.4621	0.3907	0.4166
2	0.2970	0.3056	0.2920	0.3485
5	0.0113	0.0058	0.0688	0.0957
7	0.0002	0.0000	0.0087	0.0086
10	0	0	0.0001	0.000

Cuadro 4.23: *BER* Simulada Ancho de Banda constante QAM II