

Diseño, Simulación e Implementación de códigos de canal en sistemas OFDM.

Freddy Orosco, Claudia Pintos, PhD. Boris Ramos
Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación
Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL)
Campus Gustavo Galindo, Km 30.5 vía Perimetral
forosco@espol.edu.ec, clasopin@espol.edu.ec

Resumen

Los sistemas de comunicaciones buscan transmitir un mensaje desde un extremo a otro de manera confiable, sobre un canal en el cual las señales pueden sufrir atenuaciones, retardos e interferencias. Para mitigar algunos de éstos efectos se ha diseñado la modulación OFDM que mejora la transmisión de datos en banda ancha utilizando sub portadoras ortogonales entre sí, cada una contiene información. Sin embargo, éste sistema es vulnerable a los efectos del canal con desvanecimiento plano y selectivo en frecuencia, lo cual distorsiona la señal introduciendo errores en sus tramas. Una de las técnicas para mejorar el desempeño de éstos sistemas es mediante la codificación de canal. En éste documento se analizará el desempeño de sistemas de comunicaciones OFDM con el parámetro tasa de errores, para una codificación de bloques lineal con tasa de codificación $R=2/5$ y codificación convolucional con tasa de codificación $R=1/3$. Nuestro documento esta basado en bloques de Labview proporcionados por la practica 8 de [15].

Palabras claves: COFDM, Codificación convolucional, Codificación de Bloques Lineales, Rayleigh, BER, SNR, AWGN.

Abstract

Communication systems look for transmitting a message from one end to another reliably; throw a channel in which the signals can suffer attenuation, delay and interference. To mitigate some of this effects it has been designed the OFDM modulation which improves data transmitting over wide bands using orthogonal subcarriers to each other, each one containing information. However, this systems is vulnerable to the effects of flat channels and frequency selective channels, as a consequence the signal is distorted introducing errors in frames. One of the techniques to improve the performance of these systems is through the channel coding. In this document the performance of an OFDM communication system with error rate parameter, for a linear block coding with rate $R=2/5$ and convolutional coding rate $R=1/3$ is analyzed.

Keywords: OFDM, AWGN, Rayleigh, BER, Convolutional, Linear Block Code

1. Introducción

La Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal es un esquema de modulación que divide un gran ancho de banda en múltiples subportadoras ortogonales entre sí, cada una llevando una parte de la información sobre un ancho de banda inferior. La ortogonalidad de las subportadoras significa que el máximo de una portadora coincide con el mínimo de las demás portadoras. En un instante de tiempo, se transmite una parte del mensaje sobre cada una de las subportadoras. Debido a que el canal de comunicaciones podría retardar las señales transmitidas y causar interferencia intersimbólica ISI, OFDM incorpora el denominado prefijo cíclico, el cual consiste en replicar la parte final de la señal de

mensaje al inicio de la trama, éste también llamado intervalo de guarda no contiene información alguna pero es necesario para contrarrestar los efectos del ISI. Para efectos de sincronización de las tramas de mensaje, se destinan algunas subportadoras como portadoras piloto, de modo que le sirvan al receptor para conocer que portadoras contienen información y que portadoras no contienen información.

A pesar de los beneficios del esquema de modulación OFDM, en canales con desvanecimiento tipo Rayleigh el desempeño de éstos sistemas de comunicación se ve comprometido sobre todo a niveles bajos de la relación señal a ruido, lo cual puede ser mejorado mediante la utilización de técnicas de codificación de canal. En éste documento se analizará el desempeño de un sistema de comunicaciones

OFDM considerando la tasa de errores y la ganancia de codificación, para dos algoritmos de codificación de canal: bloques lineales $R=2/5$ y convolucional $R=1/3$. Los canales a ser analizados son AWGN y Rayleigh.

En este documento se estudiarán las características de la modulación OFDM, de los canales AWGN, ISI y Rayleigh, así como de los algoritmos de codificación de canal de bloques lineales y convolucional finalizando con la explicación de los resultados obtenidos.

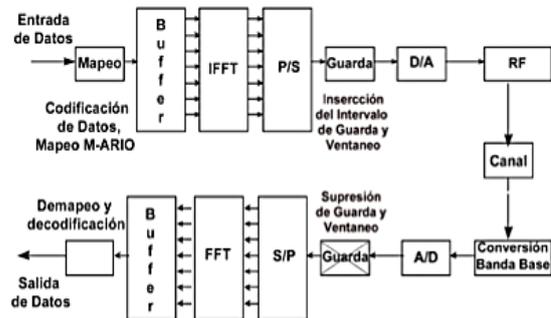


Figura 2. Esquema de un sistema modulador/demodulador OFDM [11]

2. El sistema OFDM

Un sistema de comunicaciones digital básicamente contiene los siguientes bloques:

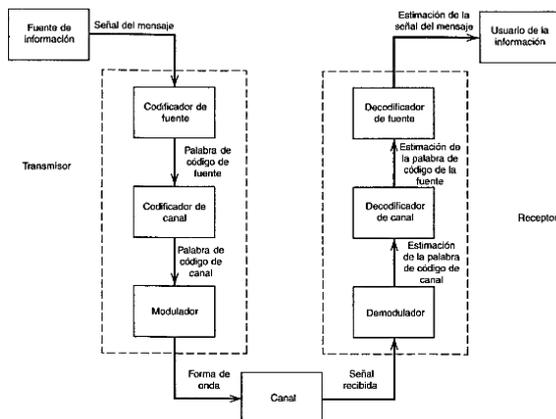


Figura 1. Esquema de un sistema de comunicaciones estándar [1]

Este documento está basado en la implementación de codificación de canal cuyo bloque se encuentra después del codificador de fuente y antes del decodificador de fuente para el codificador de canal y decodificador de canal, respectivamente. El siguiente bloque es un modulador M-QAM, que para éste documento se utilizó BPSK, QPSK y 16QAM. El modulador OFDM se encarga de transformar los símbolos de datos en símbolos OFDM mediante la transformada inversa de Fourier que se encarga de encontrar un equivalente en el dominio del tiempo de una señal en el dominio de la frecuencia que llegan de los símbolos M-arios. Un diagrama de bloques que nos ilustra el funcionamiento del modulador y demodulador OFDM se muestra en la figura 2.

La unidad de datos formada hasta éste bloque se denomina símbolos OFDM y una gráfica que nos ilustra el proceso de obtención de símbolos OFDM en el dominio del tiempo y de la frecuencia es la siguiente.

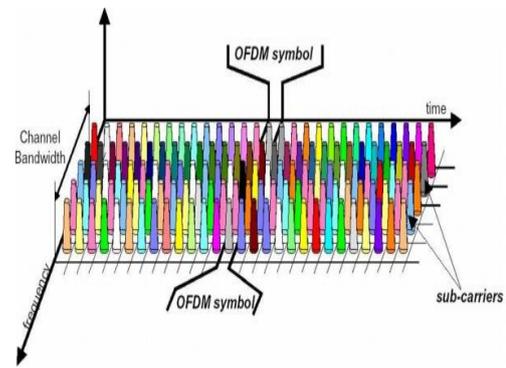


Figura 3. Distribución de símbolos OFDM [13]

2.1 Coded-OFDM

Es una técnica de modulación digital de banda ancha que combina la modulación y demodulación OFDM junto a técnicas de codificación de canal para control de errores así como entrelazamiento o interleaving, lo cual da como resultado un sistema de comunicaciones diseñado para combatir los efectos del multipaseo de un canal con desvanecimientos.

2.2 Parámetros del Perfil de Retardos

El perfil de retardos de un canal de comunicaciones proporciona información acerca de las propiedades de dispersiones de las señales que son transmitidas sobre dicho canal al ser transmitido un pulso. Algunos de los parámetros importantes son el retardo de propagación rms y el exceso de retardo promedio. El exceso de retardo promedio es el resultado de:

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_k P(\tau_k) \tau_k}{\sum_k P(\tau_k)} \quad (1)$$

Siendo $P(\tau_k)$ y τ_k , la potencia del pulso retardado y el tiempo de retardo respectivamente. Mientras que el retardo de propagación rms es el resultado de:

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

En donde:

$$\overline{\tau^2} = \frac{\sum_k P(\tau_k) \tau_k^2}{\sum_k P(\tau_k)} \quad (3)$$

2.3 Ancho de Banda Coherente

Se conoce como ancho de banda coherente al rango de frecuencias en las cuales el canal puede ser considerado plano (todas las frecuencias tienen la misma respuesta en magnitud y fase). Si el factor de correlación entre el ancho de banda y la frecuencia es de 0,9 el ancho de banda coherente es igual a:

$$B_c \approx \frac{1}{50\sigma_\tau} \quad (4)$$

2.4 Respuesta al Impulso

La respuesta al impulso contiene información necesaria para analizar la transmisión a través de un canal y puede ser utilizada para predecir y comparar el funcionamiento de varios sistemas de comunicaciones móviles y diferentes anchos de banda de transmisión para determinadas condiciones del canal [2].

2.5 Modelo con desvanecimiento plano y selectivo en frecuencia

Se dice que una señal de ancho de banda BW pasa por un canal con desvanecimiento plano cuando su ancho de banda es inferior al ancho de banda coherente, caso contrario, la señal pasa por un canal con desvanecimiento selectivo en frecuencia.



Figura 4. Canal con desvanecimiento plano [3]

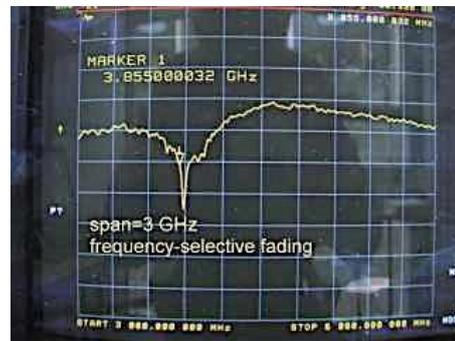


Figura 5. Canal con desvanecimiento selectivo en frecuencia [3]

2.6 Canal AWGN

El canal AWGN es un canal ideal en el cual se asume una fuente de ruido que tiene una densidad espectral de potencia constante sobre el ancho de banda del canal [13]. Lo cual se representa de la siguiente manera:

$$r_k = s_k(t) + n(t); kT < t < (k + 1)T \quad (5)$$

Un canal gaussiano es importante ya que provee una idea de cuál sería el mejor rendimiento del sistema sin la presencia de multitrayectoria.

En nuestra experimentación se estudió el comportamiento del sistema de comunicaciones a variaciones en la relación señal a ruido entre cero y 20 decibelios.

2.7 Canal ISI

Debido a que el ancho de banda de un sistema de comunicaciones es limitado, los pulsos transmitidos deben ser adecuadamente filtrados, caso contrario, al pasar por el sistema de comunicaciones pueden llegar a dispersarse en el tiempo prolongando el tiempo del símbolo y como consecuencia causar interferencia con los símbolos adyacentes ISI.

En radiocomunicaciones, la ISI está dada por un grupo de canales con diferentes retardos y amplitudes debido principalmente a la propagación por multi-trayectorias.

Los parámetros de la respuesta del canal ISI utilizados en nuestra experimentación son los siguientes:

Channel Response		
Paso 1	Paso 2	Paso 3
1 + 0i	0,247 + 0,247i	0,1 + 0,1i

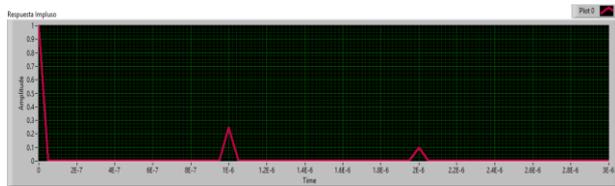


Figura 6. Respuesta en el dominio del tiempo canal ISI

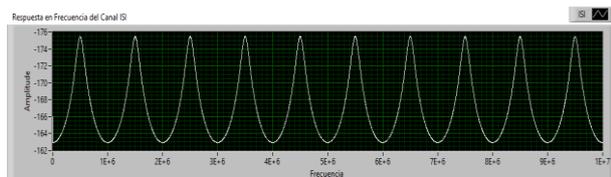


Figura 7. Respuesta en el dominio de la frecuencia canal ISI

2.8 Canal Rayleigh

Para la emulación de éste tipo de canal se ha utilizado una variable aleatoria con distribución de probabilidades de tipo Rayleigh. Una característica de este tipo de distribución es que no existe una componente dominante de las señales recibidas debidas a multipaso [11]. Se conoce que la envolvente de la suma de dos señales de ruido gaussiano ortogonales obedece a una distribución Rayleigh, siendo la media y la varianza igual a:

$$\mu_R = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sigma_g \quad (6)$$

$$\sigma_R^2 = \frac{4 - \pi}{2} \sigma_g^2 \quad (7)$$

Sabiendo que la media de una variable aleatoria gaussiana es igual a cero y con varianza σ_g . La figura 11 muestra la emulación de una señal envolvente con distribución Rayleigh como función del tiempo.

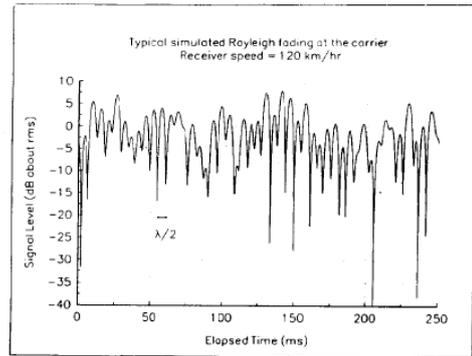


Figura 8. Canal simulado Rayleigh [2]

En nuestra experimentación, para la emulación de un canal Rayleigh se han utilizado los siguientes parámetros.

Tap	Channel A		Channel B		Doppler spectrum
	Relative delay (ns)	Average power (dB)	Relative delay (ns)	Average power (dB)	
1	0	0	0	0	Flat
2	50	-3.0	100	-3.6	Flat
3	110	-10.0	200	-7.2	Flat
4	170	-18.0	300	-10.8	Flat
5	290	-26.0	500	-18.0	Flat
6	310	-32.0	700	-25.2	Flat

Figura 9. Parámetros estándar ITU P1225 [6]

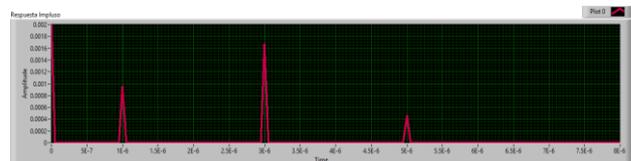


Figura 10. Respuesta en el dominio del tiempo de un canal Rayleigh.

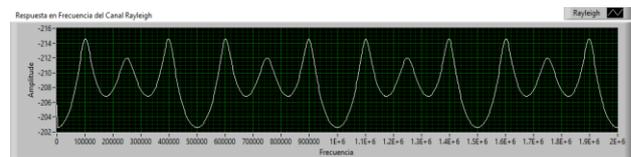


Figura 11. Respuesta en el dominio de la frecuencia de un canal con desvanecimiento selectivo en frecuencia

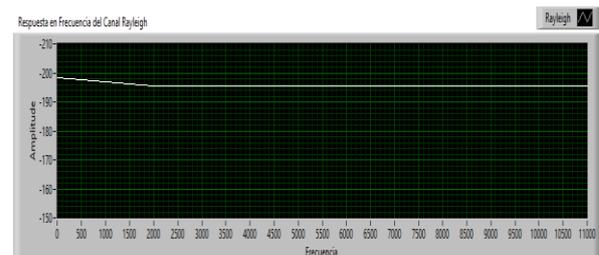


Figura 12. Respuesta en el dominio de la frecuencia de un canal con desvanecimiento plano

2.9 Codificación de Bloques Lineales

Un código de bloques lineal consiste en un grupo de vectores binario llamados palabra de código cuya suma entre cualesquiera dos palabras de código da como resultado otra palabra de código. A ésta última palabra se la conoce como linealidad. Los códigos de bloque lineal pueden ser representados como una transformación lineal de una palabra de mensaje m a una palabra de código C a través de una matriz conocida como matriz generadora G y cuya relación se muestra a continuación:

$$c = mG \quad (8)$$

De la misma forma, el decodificador de bloques lineal transforma la palabra de código C en la palabra de mensaje m utilizando la matriz de verificación de paridad H que cumple la siguiente propiedad.

$$cH^T = 0 \quad (9)$$

Sabiendo que durante la transmisión de la señal por el medio se introduce un vector de errores a la señal transmitida, de modo que el vector recibido puede representarse como:

$$r = c + e \quad (10)$$

Donde en el receptor se asigna una regla de correspondencia para el vector de errores en función del síndrome del vector recibido que se expresa como:

$$s = rH^T \quad (11)$$

De modo que el receptor primero confirma que se cumpla la propiedad $cH^T=0$ y en caso que no se cumpliera debe encontrar el síndrome del vector recibido y finalmente asignar el vector de error en función de la regla de correspondencia síndrome-vector de error.

Las limitaciones de éste tipo de codificación es que no es posible considerar todos los casos de error ya que la matriz de síndrome tiene una longitud menor a la matriz de posibles errores.

2.10 Codificación Convolutiva

En un codificador convolutiva una secuencia de entrada m es codificada mediante un conjunto de registros de desplazamiento y sumadores en módulo 2, razón por la cual la secuencia codificada depende tanto de la secuencia de mensaje actual como de las secuencias anteriores. La siguiente figura muestra un esquemática que ilustra el funcionamiento de un

codificador convolutiva con tasa de codificación $R=1/2$.

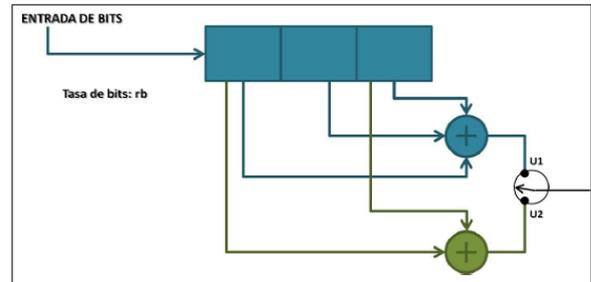


Figura 13. Esquemático de un codificador convolutiva [10]

Se puede representar el algoritmo de un codificador convolutiva mediante algunas representaciones: diagrama de árbol, representación de conexiones, respuesta al impulso, diagrama de estados y diagrama de trellis; siendo las más útiles las dos últimas representaciones. A continuación se muestra el diagrama de trellis y diagrama de estados para un codificador convolutiva con tasa $R=1/2$ como el mostrado en la figura anterior.

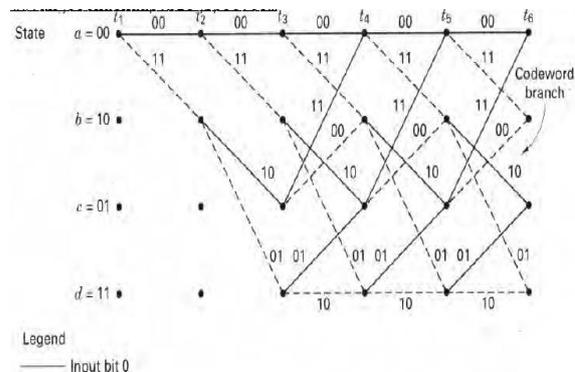


Figura 14. Diagrama de trellis de un codificador convolutiva con tasa $R=1/2$ [8]

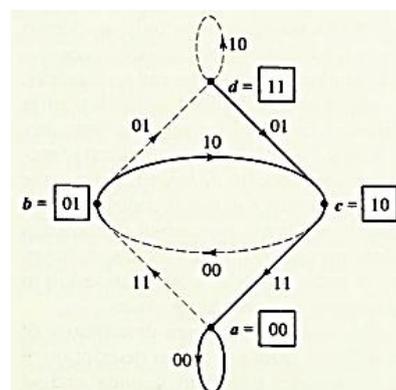


Figura 15. Diagrama de estados de un codificador convolutiva con tasa $R=1/2$ [4]

La decodificación convolucional se realiza mediante el algoritmo de Viterbi, el mismo consiste en realizar los siguientes pasos:

- Dividir la secuencia recibida total en sub-secuencias de longitud igual a la secuencia transmitida.
- Cada sub-secuencia es comparada dentro de un estado, el cual como se muestra en la figura anterior tiene cuatro posibles transiciones, calculándose la métrica que es simplemente la distancia de Hamming entre las dos subsecuencias.
- Las métricas se acumulan entre los estados siguientes y presentes y en cada estado se debe escoger el camino cuya métrica sea la menor de las cuatro.

Al terminar de recorrer el diagrama de trellis, nos quedará el camino que tenga la métrica menor entre el estado inicial y el estado final.

3. Resultados

Nuestra experimentación utilizó un sistema de comunicaciones OFDM considerando los siguientes parámetros:

Ancho de Banda: 2,5 MHz

Frecuencia Central: 1 GHz

No. Subportadoras: 64

Null Tones: 0 31 32 33

Prefijo Cíclico: 1/8

Longitud de trama: 1000 bits

Las modulaciones M-arias con las que se experimentó son BPSK, QPSK y 16QAM. Los esquemas de codificación de canal utilizados son codificación de bloques lineales con tasa $R=2/5$ y codificación convolucional con tasa $R=1/3$.

En la figura 19 se muestra la variación del parámetro tasa de errores BER con respecto a la relación señal a ruido SNR considerando tres esquemas de modulación M-ario en un canal AWGN.

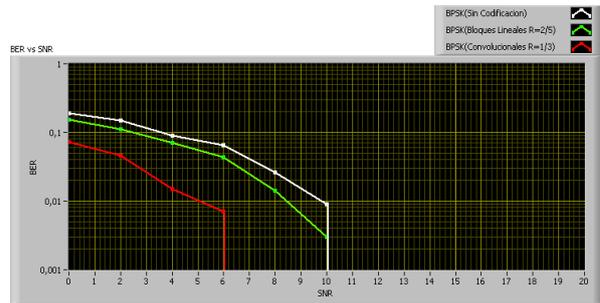


Figura 16. Curvas BER vs SNR para un canal AWGN con modulación BPSK.

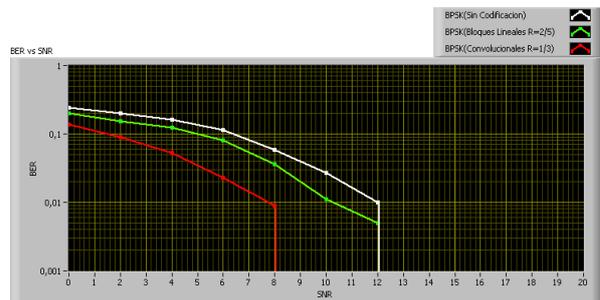


Figura 17. Curvas BER vs SNR para un canal AWGN con modulación QPSK.

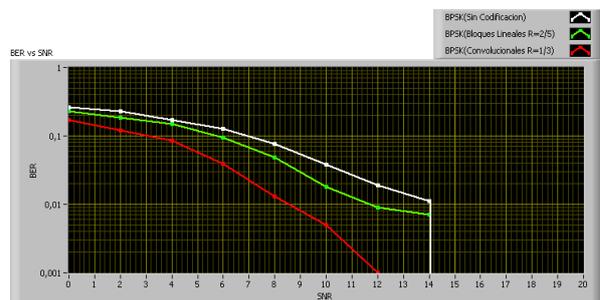


Figura 18. Curvas BER vs SNR para un canal AWGN con modulación 16QAM.

En la siguiente figura se muestra la variación del parámetro tasa de errores BER con respecto a la relación señal a ruido SNR considerando tres esquemas de modulación M-ario en un canal Rayleigh.



Figura 19. Curvas BER vs SNR para un canal RAYLEIGH usando los diferentes algoritmos implementados con modulación BPSK.

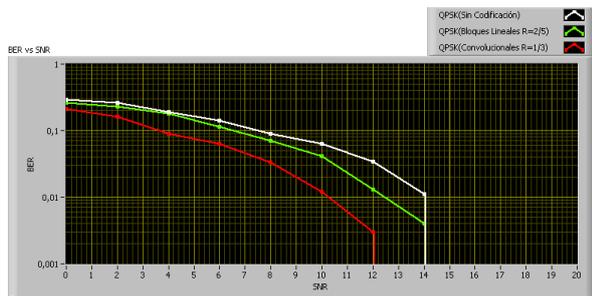


Figura 20. Curvas BER vs SNR para un canal RAYLEIGH usando los diferentes algoritmos implementados con modulación QPSK.

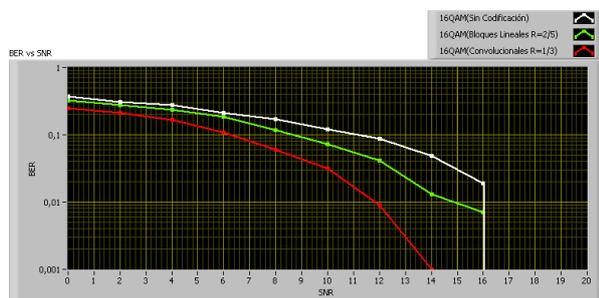


Figura 21. Curvas BER vs SNR para un canal RAYLEIGH usando los diferentes algoritmos implementados con modulación 16QAM.

Como se estudió en el marco teórico del presente documento, un sistema OFDM es prácticamente inmune a la interferencia intersimbólica ISI, por lo que su respuesta es similar a la de un canal AWGN.

4. Conclusiones

A pesar de que el uso de la codificación de canal sobre un sistema de comunicaciones mejora su desempeño en cuanto a las tasas de error obtenidas para ciertos niveles de relación señal a ruido, existe un límite a partir del cual el desempeño del sistema es similar a la de un sistema sin codificación de canal.

Entre las desventajas del uso de la codificación de canal en un sistema de comunicaciones de banda ancha está la pérdida de eficiencia espectral ya que buena parte de la señal transmitida es utilizada para verificación y corrección de errores de los bits de información.

El desempeño de un codificador convolucional es mejor frente a un codificador de bloques lineales, esto es debido a que al estar basado en estados presentes y siguientes, la información transmitida en la trama anterior sirve para verificar la trama actual, adicionalmente a los bits de redundancia dentro de la actual.

5. Referencias

- [1] S. Haykin, Sistemas de Comunicación, Mexico: Limusa Wiley, 2002.
- [2] T. Rappaport, Introduction to Wireless Communication Systems.
- [3] M. Nentwig, «DSPRelated,» [En línea]. Available: <http://www.dsprelated.com/showarticle/32.php>. [Último acceso: 20 11 2013].
- [4] Viterbi, Tomado de Principles of Digital Communication and Coding.
- [5] A. Viterbi, «Convolutional Codes and their performance in communications systems,» IEEE Transactions on Communication Technology, vol. 19, n° 5, pp. 751-772, 1971.
- [6] Recommendation ITU-R m.1225. Guidelines for evaluation of radio transmission technologies for IMT-2000
- [7] J. Proakis, Digital Communications, Mc Graw Hill.
- [8] B. Sklar, Digital Communications, EUA: Prentice Hall.
- [9] C. Torres y C. Paez, Análisis de un sistema de comunicaciones afectado por los desvanecimientos plano y lento tipo Rayleigh, 2008.
- [10] M. Mezoa, «connexions,» [En línea]. Available: <http://cnx.org/content/m36906/latest/>. [Último acceso: 10 09 2013].
- [11] L. Jimenez, J. Parrado, C. Quiza y C. Suárez, «Modulación Multiportadora OFDM», Ciencia, Investigación, Academia y Desarrollo, pp. 30-34, 2001.
- [12] S. (. E. L. Online), «Revistas Bolivianas,» [En línea]. Available: [http://www.revistasbolivianas.org.bo/img/revistas/ran/v3n4/tabla09_5.gif] [Último acceso: 10 Junio 2013].
- [13] Wikitel, «Wikitel.info,» [En línea]. Available: [http://wikitel.info/images/thumb/e/ee/Distribucion_n_O_DM.JPG/600px-Distribucion_OFDM.JPG](http://wikitel.info/images/thumb/e/ee/Distribucion_O_DM.JPG/600px-Distribucion_OFDM.JPG). [Último acceso: 15 08 2013].
- [14] A. Jara, «Tesis Multiplexación por división de frecuencia ortogonal codificada COFDM».
- [15] R. Heath, Digital Wireless Communications, National Technology & Science Press, 2012. Lab 8: Channel Coding in OFDM systems pages: 130-138