



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE UN SISTEMA INALÁMBRICO  
OPORTUNISTA EN CANALES DE TIPO RICE CON  
MODULACIONES S-QAM Y NS-QAM

AUTOR

Edwin Robert Bastidas Aragón

AÑO

2020



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE UN SISTEMA INALÁMBRICO  
OPORTUNISTA EN CANALES DE TIPO RICE CON MODULACIONES S-QAM  
Y NS-QAM

“Trabajo de Titulación presentado en conformidad con los requisitos  
establecidos para optar por el título de Ingeniero en redes y  
telecomunicaciones”

Profesor Guía  
PhD. Nathaly Verónica Orozco Garzón

Autor  
Edwin Robert Bastidas Aragón

Año  
2020

## DECLARACIÓN PROFESOR GUÍA

"Declaro haber dirigido este trabajo, Análisis del desempeño de un sistema inalámbrico oportunista en canales de tipo Rice con modulaciones S-QAM y NS-QAM, a través de reuniones periódicas con el estudiante Edwin Robert Bastidas Aragón, en el semestre 202010, orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema escogido y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación".



---

Nathaly Verónica Orozco Garzón

Doctora en Ingeniería Eléctrica en el Área de Telecomunicaciones y Telemática

CI. 172093858-6

## DECLARACIÓN PROFESOR CORRECTOR

"Declaro haber revisado este trabajo, Análisis del desempeño de un sistema inalámbrico oportunista en canales de tipo Rice con modulaciones S-QAM y NS-QAM, de Edwin Robert Bastidas Aragón, en el semestre 202010, dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los trabajos de Titulación".



---

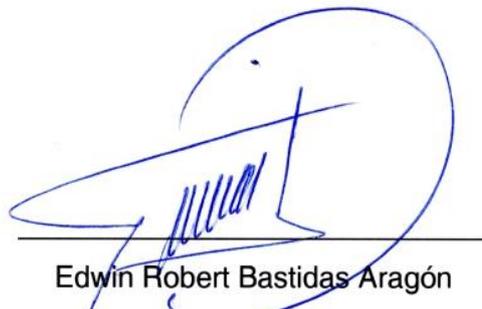
Carvajal Mora Henry Ramiro

Doctor en Ingeniería Eléctrica en el Área de Telecomunicaciones y Telemática

CI.172132786-2

## DECLARACIÓN DE AUDITORÍA DEL ESTUDIANTE

“Declaro que este trabajo es original, de mi autoría, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes.”

A handwritten signature in blue ink, consisting of a large, stylized initial 'E' followed by several vertical strokes, all contained within a large, loopy circular flourish.

Edwin Robert Bastidas Aragón

Cl. 1718303702

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por la salud y llenarme de conocimiento necesario para el comienzo este proyecto y terminarlo de manera exitosa. Así como a mis docentes, quienes, a lo largo de mi carrera, me supieron inculcar todos los conocimientos necesarios para ser un excelente profesional, de manera particular agradecer a mí tutora PhD. Nathaly Orozco por su constante apoyo y profesionalismo.

De igual forma a mis padres Lucia Aragón y Marcelo Rea por su maravilloso ejemplo de vida, enseñándome valores como el respeto, la responsabilidad, honestidad entre otros, mismos que me permitieron superarme de manera personal y profesional.

## DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi hijo Christopher, quien, a partir de su llegada, me motivo a culminar mi carrera, con esfuerzo y dedicación cumpliendo diferentes metas y objetivos.

Quiero dedicar además este sueño cumplido a mi querida Madre, misma que con sus valiosos consejos supo guiarme y darme fuerzas en los momentos difíciles, así como a mis hermanos y personas cercanas que estuvieron presentes apoyándome y dándome ánimos en todo momento para alcanzar mi objetivo.

## RESUMEN

En el presente trabajo se analiza el desempeño de un sistema inalámbrico con transmisión oportunista en canal con desvanecimiento de tipo Rice empleando esquemas de modulación de amplitud en cuadratura (QAM) cuadradas y no cuadradas. Al considerar un desvanecimiento Rice, el receptor tiene línea de vista directa con el transmisor, teniendo un mejor escenario para la transmisión. Sin embargo, con el fin de mejorar el desempeño, el sistema utilizado de transmisión oportunista establece diferentes valores de umbral para distintos escenarios dependiendo de la probabilidad de transmisión deseada. El análisis del sistema se lo realiza en términos de probabilidad de error de bit, parámetro con el cual se puede hacer comparaciones entre sistemas de transmisión ordinarios y sistemas de transmisión oportunistas. Los resultados se obtienen mediante simulación, para lo cual se utilizó el software MATLAB, que permite mostrar de una manera gráfica la probabilidad de error de bit de ambos sistemas. Los resultados evidencian como en el sistema de transmisión oportunista mitiga los efectos del desvanecimiento. En el trabajo se emplean diferentes esquemas de modulación cuadradas y no cuadradas. Así se puede verificar que, si el orden de la modulación aumenta, se envía una mayor cantidad de bits por cada símbolo, aprovechando por lo tanto el ancho de banda del canal, pese a que el desempeño disminuye. No obstante, una transmisión oportunista es más eficiente que la ordinaria.

**Palabras claves:** Sistema oportunista, desvanecimiento Rice, modulaciones cuadradas y no cuadradas, probabilidad de error de bit.

## ABSTRACT

This paper analyzes the performance of a wireless system with opportunistic transmission in channel with fading Rice type using square and non-square amplitude modulation (QAM) schemes. When considering a Rice fading, the receiver has direct line of sight with the transmitter, having a better scenario for transmission. However, in order to improve performance, the opportunistic transmission system used sets different threshold values for different parameters determined for the desired transmission probability. The system analysis is performed in terms of the probability of bit error, a parameter with which comparisons can be made between ordinary transmission systems and opportunistic transmission systems. The results can be used by simulation, for which MATLAB software is known, which allows to graphically show the probability of bit error of both systems. The results show how in the opportunistic transmission system it mitigates the effects of fading. Different square and non-square modulation schemes are used in the work. Thus, it can be verified that, if the modulation order increases, a greater amount of bits is sent for each symbol, thereby taking advantage of the bandwidth of the channel, despite the controlled performance. However, an opportunistic transmission is more efficient than the ordinary one.

**Keywords:** Opportunistic system, Rice fading, square and non-square modulations, bit error probability.

# ÍNDICE

INTRODUCCIÓN .....	1
Antecedentes.....	1
Alcance.....	2
Justificación .....	2
Objetivos .....	3
Objetivo General.....	3
Objetivos Específicos .....	3
1 CONCEPTOS BÁSICOS .....	4
1.1 Sistema de comunicación digital .....	4
1.2 Modulación digital .....	5
1.2.1 Modulación PAM (Modulación por amplitud de pulsos).....	6
1.2.2 Modulación ASK (Modulación por desplazamiento de amplitud).....	6
1.2.3 Modulación BPSK (Modulación por desplazamiento binario de fase).....	7
1.2.4 Modulación QPSK (Modulación por desplazamiento de fase en cuadratura).....	8
1.2.5 Modulación QAM (Modulación de amplitud en cuadratura) .....	8
1.2.5.1 Modulaciones QAM cuadradas .....	9
1.2.5.2 Modulaciones QAM no cuadradas .....	10
1.3 Diagrama Constelación.....	10
1.4 Fenómenos que ocurren en un sistema inalámbrico .....	11
1.4.1 Ruido .....	11
1.4.2 Desvanecimiento .....	12
1.4.3 Desvanecimiento Rayleigh .....	13
1.4.4 Desvanecimiento Rice.....	14

1.5	Eficiencia Espectral.....	16
1.6	Probabilidad de Error de Bit Media (BER media) ..	17
1.6.1	Probabilidad de Error de Bit en Canales AWGN .....	18
1.6.2	Probabilidad de Error de Bit Media en Canales con Desvanecimiento .....	19
2	<b>DISEÑO Y DESARROLLO DE UN SISTEMA OPORTUNISTA CON DESVANECIMIENTO TIPO RICE EMPLEANDO MODULACIONES CUADRADAS Y NO CUADRADAS .....</b>	19
2.1	Introducción .....	19
2.2	Descripción del Sistema.....	20
2.3	Transmisión oportunista empleando modulaciones cuadradas y no cuadradas.....	22
2.4	Cálculo del umbral .....	23
2.5	Cálculo de la eficiencia espectral .....	25
2.6	Probabilidad de error de bit de un sistema oportunistas que emplea modulaciones QAM cuadradas y no cuadradas.....	26
2.7	Diseño del algoritmo para simulación.....	27
3	<b>ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS .....</b>	31
3.1	Análisis de la BER con modulaciones S-QAM .....	31
3.2	Análisis de la BER con modulaciones NS-QAM....	34
3.3	Análisis de la BER en sistemas de transmisión oportunistas con modulaciones S-QAM y NS-QAM .....	38
3.4	Comparación de sistemas con transmisión oportunistas y sistemas con transmisión ordinaria.....	39

3.4.1	Comparación usando modulaciones S-QAM.....	40
3.4.2	Comparación usando modulaciones NS-QAM .....	47
4	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>54</b>
4.1	Conclusiones .....	54
4.2	Recomendaciones .....	55
	<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>56</b>
	<b>ANEXOS .....</b>	<b>59</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de bloques de un sistema de transmisión digital.....	5
Figura 2. Modulador BPSK.....	7
Figura 3. Diagrama de constelación 16-QAM.....	9
Figura 4. Diagrama de constelación para diferentes esquemas de modulación QAM. ....	11
Figura 5. Representación gráfica de desvanecimiento.....	12
Figura 6. Distribución Rayleigh para tres valores de varianza. ....	13
Figura 7. PDF de desvanecimiento tipo Rice para cuatro valores de K. ....	16
Figura 8. Diagrama de bloques de un sistema oportunista .....	21
Figura 9. Desvanecimiento por encima del umbral. ....	22
Figura 10. Desvanecimiento por debajo del umbral. ....	23
Figura 11. Comparación de un sistema de transmisión ordinario y oportunista con probabilidad de transmisión $q = 1/2$ . ....	25
Figura 12. Diagrama en bloques de un esquema de modulación M-QAM .....	29
Figura 13. Ventana de herramienta Bit Error Rate Analysis Tool.....	30
Figura 14. BER en función de $E_b/N_0$ para un sistema oportunista que usa diferentes modulaciones S-QAM y umbral $m = 0,8325$ en un canal Rice y factor $K=0$ . ....	32
Figura 15. BER en función de $E_b/N_0$ para un sistema oportunista que usa diferentes modulaciones S-QAM y umbral $m = 0,9379$ en un canal Rice y factor $K=0,25$ . ....	32
Figura 16. BER en función de $E_b/N_0$ para un sistema oportunista que usa diferentes modulaciones S-QAM y umbral $m = 1,2437$ en un canal Rice y factor $K=1$ . ....	33
Figura 17. BER en función de $E_b/N_0$ para un sistema oportunista que usa modulación 4-QAM con umbrales $m_1 = 0,9379$ , $m_2 =$ $1,1773$ y $m_3 = 1,3199$ en un canal Rice y factor $K=0,25$ .....	34

Figura 18. BER en función de $E_b/N_0$ para un sistema oportunista que usa diferentes modulaciones NS-QAM y umbral $m = 0,8325$ en un canal Rice y factor $K=0$ . .....	35
Figura 19. BER en función de $E_b/N_0$ para un sistema oportunista que usa diferentes modulaciones NS-QAM y umbral $m = 0,9379$ en un canal Rice y factor $K=0,25$ . .....	36
Figura 20. BER en función de $E_b/N_0$ para un sistema oportunista que usa diferentes modulaciones NS-QAM y umbral $m = 1,2437$ en un canal Rice y factor $K=1$ . .....	37
Figura 21. BER en función de $E_b/N_0$ para un sistema oportunista que usa modulación 8-QAM con umbrales $m_1 = 0,9379$ , $m_2 = 1,1773$ y $m_3 = 1,3199$ en un canal Rice y factor $K=0,25$ . .....	38
Figura 22. BER en función de $E_b/N_0$ para un sistema oportunista que usa modulaciones S-QAM y NS-QAM considerando un umbral $m = 1,2437$ en un canal Rice y factor $K=1$ . .....	39
Figura 23. Comparación de la BER de un sistema ordinario y un sistema oportunista que usa modulaciones S-QAM considerando un umbral $m = 0,9379$ en un canal tipo Rice con un factor $K=0,25$ . .....	40
Figura 24. Comparación de la BER de un sistema ordinario y un sistema oportunista que usa modulación 4-QAM considerando un umbral $m = 1,1773$ en un canal tipo Rice con un factor $K=0,25$ . .....	41
Figura 25. Comparación de la BER de un sistema ordinario y un sistema oportunista que usa modulación 16-QAM considerando un umbral $m = 1,1773$ en un canal tipo Rice con un factor $K=0,25$ . .....	43
Figura 26. Comparación de la BER de un sistema ordinario y un sistema oportunista que usa modulación 64-QAM considerando un umbral $m = 1,1773$ en un canal tipo Rice con un factor $K=0,25$ . .....	44

Figura 27. Comparación de la BER de un sistema ordinario y un sistema oportunista que usa modulación 256-QAM considerando un umbral $m = 1,1773$ en un canal tipo Rice con un factor $K=0,25$ . .....	46
Figura 28. Comparación la BER de un sistema ordinario y un sistema oportunista que usa modulaciones S-QAM considerando un umbral $m = 0,9379$ en un canal tipo Rice con un factor $K=0,25$ . .....	48
Figura 29. Comparación de la BER de un sistema ordinario y un sistema oportunista que usa modulación 8-QAM considerando un umbral $m = 1,1773$ en un canal tipo Rice con un factor $K=0,25$ . .....	49
Figura 30. Comparación de la BER de un sistema ordinario y un sistema oportunista que usa modulación 32-QAM considerando un umbral $m = 1,1773$ en un canal tipo Rice con un factor $K=0,25$ . .....	50
Figura 31. Comparación de la BER de un sistema ordinario y un sistema oportunista que usa modulación 128-QAM considerando un umbral $m = 1,1773$ en un canal tipo Rice con un factor $K=0,25$ . .....	52

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Umbrales considerados en el análisis del proyecto.....	24
Tabla 2. Valores comparativos de un sistema que emplea transmisión oportunista con canal de desvanecimiento de tipo Rice considerando un umbral $m = 1.1773$ con media $s = 1$ y factor $K=1$ en un esquema de modulación 4-QAM.....	42
Tabla 3. Valores comparativos de un sistema que emplea transmisión oportunista con canal de desvanecimiento de tipo Rice considerando un umbral $m = 1.1773$ con media $s = 1$ y factor $K=1$ en un esquema de modulación 16-QAM.....	43
Tabla 4. Valores comparativos de un sistema que emplea transmisión oportunista con canal de desvanecimiento de tipo Rice considerando un umbral $m = 1.1773$ con media $s = 1$ y factor $K=1$ en un esquema de modulación 64-QAM.....	45
Tabla 5. Valores comparativos de un sistema que emplea transmisión oportunista con canal de desvanecimiento de tipo Rice considerando un umbral $m = 1.1773$ con media $s = 1$ y factor $K=1$ en un esquema de modulación 256-QAM.....	46
Tabla 6. Valores comparativos de un sistema que emplea transmisión oportunista con canal de desvanecimiento de tipo Rice considerando un umbral $m = 1.2437$ con media $s = 1.5$ y factor $K=2.25$ en un esquema de modulación 8-QAM.....	49
Tabla 7. Valores comparativos de un sistema que emplea transmisión oportunista con canal de desvanecimiento de tipo Rice considerando un umbral $m = 1.2437$ con media $s = 1.5$ y factor $K=2.25$ en un esquema de modulación 32-QAM.....	51
Tabla 8. Valores comparativos de un sistema que emplea transmisión oportunista con canal de desvanecimiento de tipo Rice considerando un umbral $m = 1.2437$ con media $s = 1.5$ y factor $K=2.25$ en un esquema de modulación 128-QAM.....	52

## INTRODUCCIÓN

### Antecedentes

El giro radical en conectividad y convergencia que han tomado las telecomunicaciones desde algunos años, sumado a los avances tecnológicos actuales, permiten tener una comunicación inalámbrica confiable, con altas velocidades de transmisión en varias aplicaciones y servicios. Sin embargo, el crecimiento exponencial de los usuarios obliga a las operadoras a evolucionar sus redes de comunicación continuamente.

En la actualidad, debido a la utilización continua y masiva del espectro radioeléctrico para la transmisión de datos, se tiene una gran problemática con su disponibilidad, por lo que se debe realizar varios estudios e investigar técnicas que permitan hacer uso eficiente del espectro radioeléctrico.

Existen fenómenos físicos que afectan el desempeño de un sistema considerablemente. Para ello se investiga sobre alternativas o técnicas que mitiguen estos fenómenos.

El ruido es un limitante importante en la calidad de la transmisión de datos en un sistema de comunicación inalámbrico, siendo ocasionado de manera natural, como cambios climáticos o situaciones geográficas extremas y de manera artificial como distorsión armónica en la red, parámetros que terminan degradando la señal transmitida. (M.H. Rábanos et al., 2015)

Debido a la fácil portabilidad que existe en la actualidad, el receptor puede movilizarse por distintas zonas geográficas. Por este motivo, se genera un fenómeno denominado desvanecimiento y este puede presentarse en dos tipos: desvanecimiento lento ocasionado por la aparición de cuerpos "opacos" como montañas y desvanecimiento rápido ocasionado por las variaciones de distancia del receptor, haciendo que la señal transmitida tenga una probabilidad de error alta (M.H. Rábanos et al., 2015).

Para la solución ante los problemas de ruido y desvanecimiento, existen varias propuestas técnicas entre ellas destacamos las redes de transmisión oportunista, las cuales ofrecen una mejora identificable en el proceso de

detección de datos en redes inalámbricas, estos estudios son basados en sistemas distribuidos de planificación oportunista (del inglés, *Distributed Opportunistic Scheduling*, DOS), utilizando diferentes esquemas de modulación.

Un sistema oportunista ofrece varias ventajas en un canal con desvanecimiento mejorando de una manera considerable el desempeño del sistema, con una probabilidad de error de bit baja teniendo una notable mejora en la tasa de transmisión (Orozco N., 2014).

Las modulaciones de amplitud y cuadratura (QAM) no cuadradas poseen gran capacidad de inmunidad al ruido, lo que las hacen que sean utilizadas en la transmisión de datos, obteniendo resultados interesantes en diferentes tipos de enlaces. (Varughese et al., 2016)

El orden de la modulación dictamina la tasa de transmisión.

### **Alcance**

El alcance del presente anteproyecto es realizar el análisis del desempeño de un sistema inalámbrico con transmisión oportunista en un canal modelado con desvanecimiento de tipo Rice el cual considera modulaciones de amplitud y cuadratura cuadradas (S-QAM) y modulaciones de amplitud y cuadratura no cuadradas (NS-QAM).

Se evaluará el desempeño del sistema con la herramienta de simulación MATLAB, la cual permite la simulación de las señales para su posterior comparación tanto en sistemas ordinarios como en sistemas oportunistas. Este análisis de desempeño se realizará en términos de la probabilidad de error de bit (BER), para lo cual se obtendrán y analizarán curvas de desempeño.

### **Justificación**

La transmisión inalámbrica es un medio de comunicación con altas velocidades, sin embargo, es el medio de comunicación más vulnerable, existen factores que afectan a la señal como ruido y desvanecimiento, los cuáles comprometen el desempeño del sistema, degradándolo así considerablemente. Por lo tanto, en la literatura se trabaja con técnicas para mejorar la calidad de transmisión y

recepción de datos, proponiendo varias técnicas por ejemplo los sistemas oportunistas que pueden dar solución de una manera eficiente y eficaz a la transmisión de datos mediante canales inalámbricos, se puede realizar más investigaciones a futuro para el análisis de canales oportunistas con diferentes tipos de modulaciones de esta manera lograr que la transmisión de datos contenga el menor ruido e interferencia posible.

Existen diversas técnicas de modulación que permiten alterar o modificar varias señales en la señal portadora optimizando el transporte de los datos (Hanzó, 2004). Para este proyecto se utilizarán modulaciones en fase y cuadratura cuadradas y no cuadradas, pues las mismas disponen de una mayor eficiencia espectral que otras modulaciones como PSK (*Phase Shift Keying*) o ASK (*Amplitude Shift Keying*), de esta manera se genera una transmisión más eficiente. (M.H. Rábanos et al., 2015)

## **Objetivos**

### **Objetivo General**

Analizar el desempeño de un sistema inalámbrico con una transmisión oportunista en un canal con desvanecimiento de tipo Rice empleando modulaciones en amplitud y cuadratura cuadradas y no cuadradas mediante la probabilidad de error de bit.

### **Objetivos Específicos**

- Realizar un estudio de un sistema de comunicación inalámbrico con transmisiones oportunistas analizando modulaciones cuadradas y no cuadradas
- Simular mediante el software MATLAB un sistema de comunicación inalámbrico con una transmisión oportunista en un canal de desvanecimiento tipo Rice con modulaciones cuadradas y no cuadradas.
- Analizar los resultados obtenidos de la simulación del sistema oportunista mediante la probabilidad de error de bit, analizar el

desempeño del sistema en modulaciones cuadradas y no cuadradas frente a un sistema de comunicación inalámbrico tradicional.

- Comparar los resultados obtenidos del desempeño del sistema oportunista con un sistema de transmisión ordinario.

## **1 CONCEPTOS BÁSICOS**

### **1.1 Sistema de comunicación digital**

Un sistema digital transmite información de la siguiente forma; la señal original ingresa al codificador del transmisor, aquí se convierte la señal analógica en una señal digital y además se realiza una compresión de la señal, con el objetivo de eliminar redundancias, es decir disminuye la tasa de bits para optimizar el ancho de banda utilizado. Posteriormente, la señal pasa por un codificador de canal, el cual introduce redundancias a la señal para no perder información debido al ruido o imperfecciones del canal. Finalmente, se tiene un componente electrónico modulador que, dependiendo del esquema de modulación, modifica la onda de la portadora ya sea en fase o en cuadratura para que la señal sea enviada por el canal de transmisión. Sin embargo, hay que tener en cuenta que cuando una señal es modulada, los efectos del ruido sobre la señal incrementan.

En el receptor se realiza el proceso inverso para recuperar la señal que fue transmitida como se observa en la Figura 1, después de que la señal sale del canal, pasa por un filtro para eliminar el ruido excesivo, luego, la señal es demodulada y se extrae la portadora que dependiendo del esquema de modulación puede haberse enviado en fase ó cuadratura o ambas. En el decodificador de canal se eliminan las redundancias y el decodificador de fuente se realiza la reconstrucción final de la señal para ser entregada al destinatario.

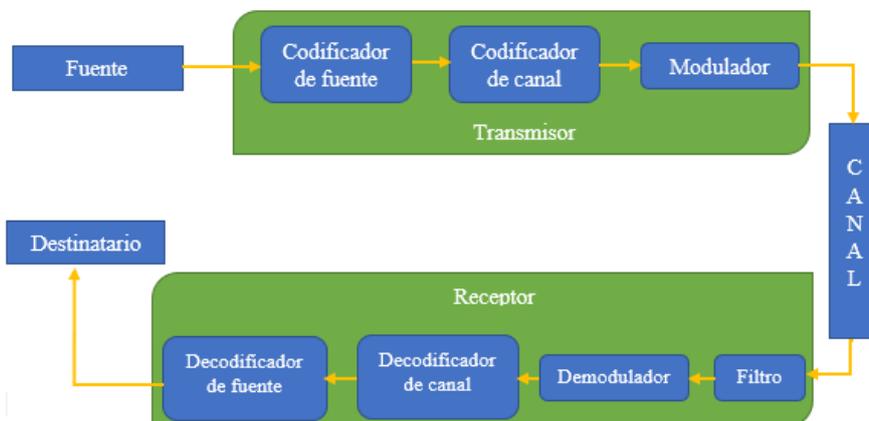


Figura 1. Esquema de bloques de un sistema de transmisión digital.

## 1.2 Modulación digital

La modulación implica adecuar la señal para que pueda ser transmitida por el canal, también tiene como propósito realizar una transmisión eficiente de los bits, es decir, los datos originales deben comprimirse e integrarse en formas de onda de baja o alta frecuencia siempre que sean compatibles con el medio de transmisión, para poder ser enviados al receptor.

Dependiendo del esquema de modulación, se emplean distintas técnicas para obtener la forma de onda de la portadora. En el receptor se recuperan la información transmitida, a este proceso inverso se le denomina demodulación. Si la demodulación no es óptima la tasa de error de bit es muy alta y la transmisión se torna ineficiente.

Los diferentes esquemas de modulación se pueden representar gráficamente mediante formas de onda y más a detalle en diagramas de constelación, los cuales serán detallados en las siguientes secciones.

A continuación, se define los diferentes tipos de modulación digital que se emplean en los sistemas de transmisión inalámbrica:

### 1.2.1 Modulación PAM (Modulación por amplitud de pulsos)

Es una técnica utilizada en transmisión banda base, consiste en modificar la amplitud de la señal portadora en un tren de pulsos dependiendo de la información transmitida. PAM es comúnmente utilizada en transmisiones donde el espectro puede extenderse de una forma que la frecuencia pueda llegar a cero. La señal modulada con PAM es dada por la Ecuación 1 (Orozco N., 2014):

$$s(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} A s_k g(t - kT_s),$$

(Ecuación 1)

dónde  $A$  es la amplitud de la señal transmitida,  $s_k$  es el  $k$ -ésimo símbolo transmitido que pertenece a una constelación formada por  $M$  símbolos,  $T_s$  es la duración del símbolo y  $g(t)$  es la forma de pulso que cumple el criterio de Nyquist.

### 1.2.2 Modulación ASK (Modulación por desplazamiento de amplitud)

ASK implica la variación de la amplitud de una onda portadora con frecuencia ( $f_c$ ) y fase ( $\theta$ ) constantes, que se representa a partir de la Ecuación 2 (Orozco N., 2014):

$$s_c(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} A s_k g(t - kT_s) \cos[2\pi f_c(t - kT_s) + \theta],$$

(Ecuación 2)

de esta forma se puede escribir que el equivalente banda-base de la Ecuación 3 (Orozco N., 2014) es:

$$s_i(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} A s_k g(t - kT_s),$$

(Ecuación 3)

cuando  $As_k = 0, A, \dots, (M - 1)A$ , es conocida como modulación M-ASK unipolar, mientras que sí  $As_k = \pm A, \pm 3A, \dots, \pm(M - 1)A$ , se tiene una modulación M-ASK polar. La modulación polar se caracteriza porque tiene mejor desempeño.

### 1.2.3 Modulación BPSK (Modulación por desplazamiento binario de fase)

BPSK permite variar la fase de la portadora con saltos de  $180^\circ$  ( $\pi$  rad). Dependiendo del bit a ser transmitido, se tienen dos fases de salida para una misma señal portadora. En la Figura 2 se observa un esquema gráfico del funcionamiento de un transmisor BPSK, donde el convertidor de nivel realiza el cambio de estado de un nivel de voltaje a un estado lógico binario, el oscilador de la portadora es un componente que genera señales mismas que se encuentran en la misma fase que la portadora, para luego ser introducido al modulador balanceado que dependiendo del bit de entrada conmuta el ángulo de la fase moduladora. Luego la señal pasa por un filtro pasabanda antes de ser transmitida.

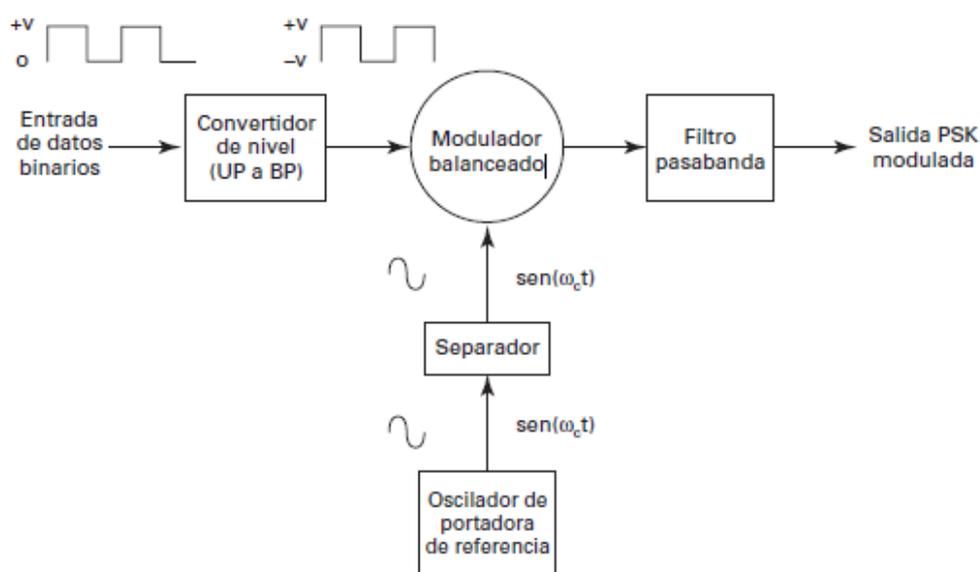


Figura 2. Modulador BPSK.

Tomado de: (Tomasi, Hernández & Pozo, 2003)

#### 1.2.4 Modulación QPSK (Modulación por desplazamiento de fase en cuadratura)

Es una extensión de BPSK, pero la portadora posee cuatro fases distintas, con entradas de dos bits formando cuatro combinaciones posibles (00 01 10 11). Las señales QPSK pueden estar dadas de acuerdo con la Ecuación 4 (Krouk & Semenov, 2011) como:

$$s_i(t) = \sqrt{\frac{2E}{T}} \cos\left(2\pi f_c t + \frac{\pi i}{4}\right), \quad i = 0,1,2,3,$$

(Ecuación 4)

dónde  $E$  es la energía de la señal por periodo de símbolo,  $T$  es el periodo de símbolo y  $f_c$  es la frecuencia de la portadora.

#### 1.2.5 Modulación QAM (Modulación de amplitud en cuadratura)

Este esquema de modulación permite transmitir tasas de bit más altas combinando variación de amplitud y fase dentro de la misma portadora y utilizando dos canales diferentes desfasados en  $90^\circ$ , lo que evita interferencia entre estos canales, es necesario tener un circuito de recuperación de la portadora.

En la Figura 3 se observa el mapeo de bits usando codificación de Gray, donde símbolos adyacentes solo difieren en un bit entre sí.

En QAM se logra mejorar considerablemente la eficiencia espectral, ya que se aprovecha el ancho de banda del canal al momento de transmitir los datos.

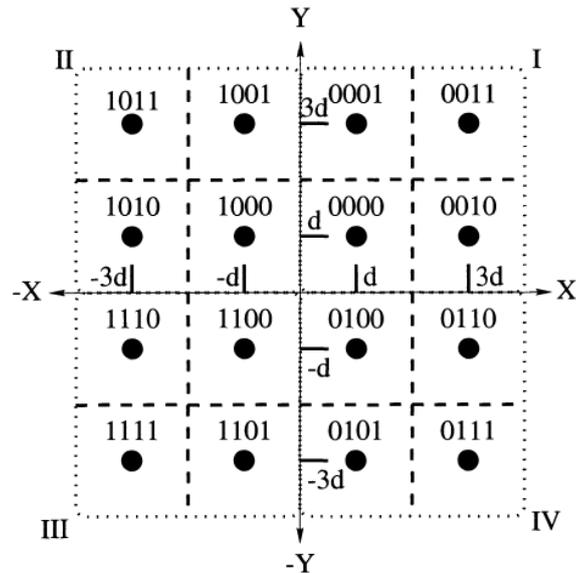


Figura 3. Diagrama de constelación 16-QAM

Tomado de: (Hanzó, 2004)

La variable  $d$  que aparece en la Figura 3 se puede escribir como (Hanzó, 2004):

$$d = \sqrt{\frac{3m \times E_b}{2(M-1)}}$$

(Ecuación 5)

dónde  $M$  es el orden de la modulación, que para el caso de la Figura 3  $M = 16$ ,  $m = \log_2 M$  representa el número de bits por símbolo y  $E_b$  es la energía transmitida por bit.

### 1.2.5.1 Modulaciones QAM cuadradas

Entre las diferentes variaciones de la modulación QAM se pueden construir constelaciones dónde  $M$  es el número de formas de onda representado por  $M = 2^k$  para  $k \geq 2$ , que representa al número de bits transmitidos por símbolo.

Constelaciones cuadradas donde el valor de  $k$  es por ejemplo 4-QAM, 16-QAM, 64-QAM y 256-QAM, construyen constelaciones que optimizan el ancho de banda, es decir podemos enviar más bits sin afectar el ancho de banda.

Dependiendo del tipo de enlace se puede escoger entre las variaciones M-QAM, siendo así que se puede modular modificando la amplitud esto implica que la distancia de los puntos de constelación sea más corta y por tanto más susceptible al ruido, siempre que se utilice la misma  $E_b$ .

### 1.2.5.2 Modulaciones QAM no cuadradas

En estas constelaciones donde el valor de  $k$  es por ejemplo 8-QAM, 32-QAM y 128-QAM, se consideran modulaciones QAM no cuadradas.

Al momento de utilizar los distintos esquemas de modulación se debe tratar en lo posible que la relación señal a ruido normalizada  $E_b/N_0$  sea la mayor posible para que el enlace funcione de la manera más óptima posible. Para ello se debe verificar la velocidad de datos a ser transmitidos y el orden de modulación QAM, de manera que, en el proceso de recepción se tenga una tasa de error de bit aceptable para el enlace, sin tener deterioro en la calidad de la señal aumentando el desempeño.

## 1.3 Diagrama Constelación

Los esquemas de modulación QAM pueden ser representados gráficamente mediante la descomposición de una base ortonormal, de manera que la señal puede ser representada como un vector. Los puntos de la constelación son codificados mediante codificación de Gray.

No es la densidad espectral de potencia unilateral del ruido.

En la Figura 4 se observa la constelación de diferentes esquemas de modulación QAM.

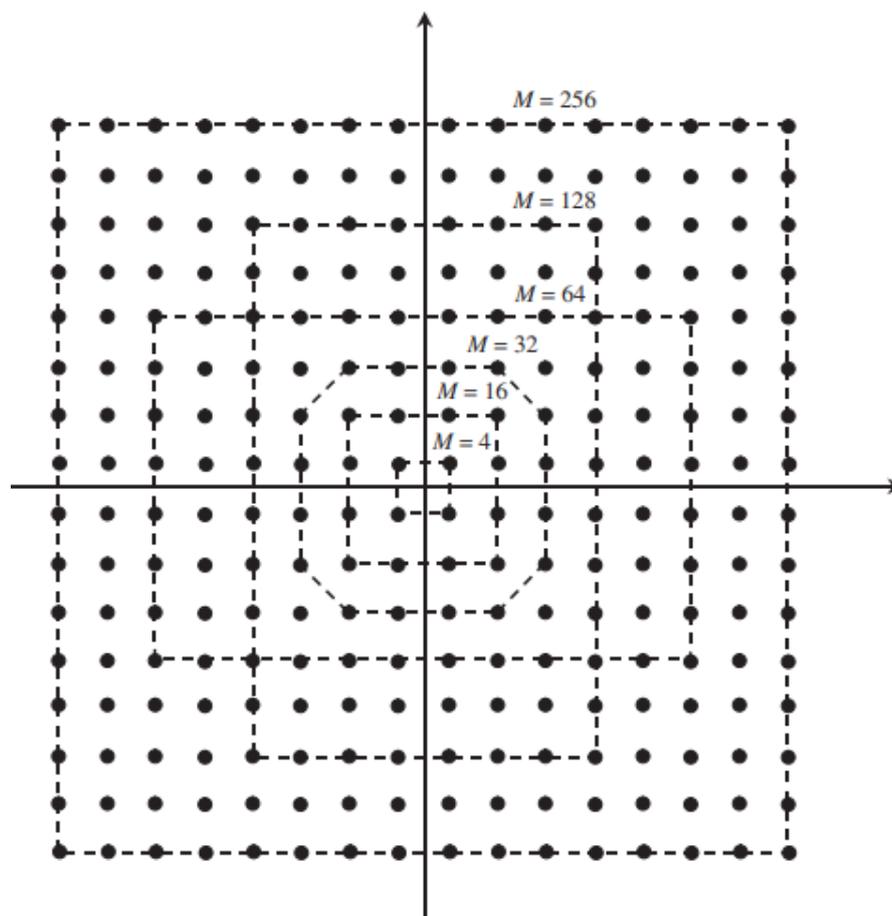


Figura 4. Diagrama de constelación para diferentes esquemas de modulación QAM.

Tomado de: (Ha, 2011)

#### 1.4 Fenómenos que ocurren en un sistema inalámbrico

En un sistema de transmisión inalámbrico, se presentan fenómenos que afectan la calidad del enlace tales como, interferencias en la conexión, cuerpos opacos como árboles, edificios, entre otros, la pérdida de potencia por la distancia entre transmisor y receptor, ruido, desvanecimiento. Estos factores hacen que la señal se degrade y no sea recibida de una manera óptima.

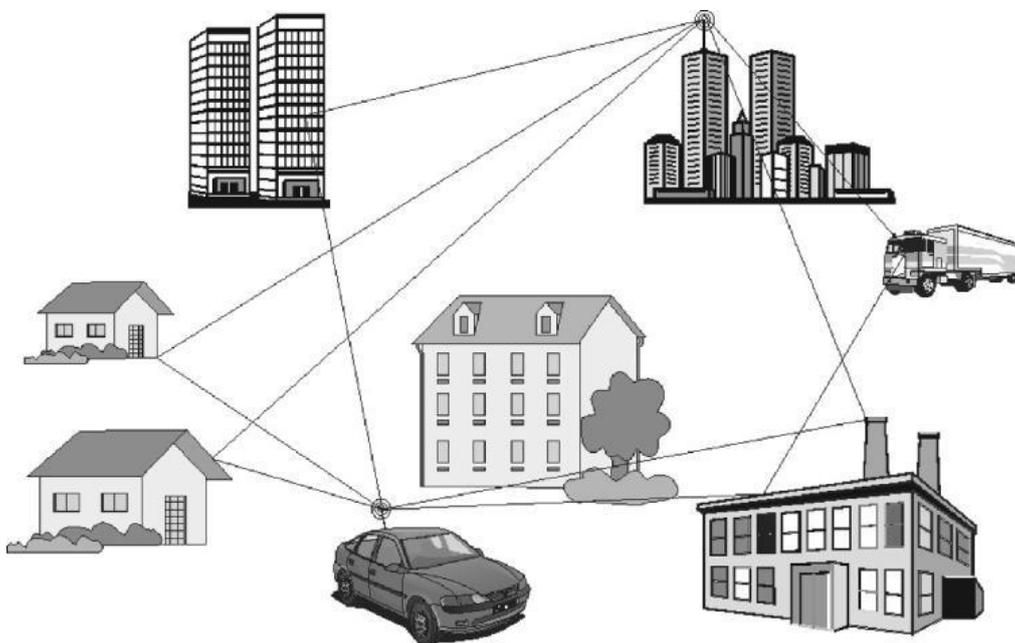
##### 1.4.1 Ruido

El ruido es un fenómeno que degrada la señal transmitida en un sistema de comunicación inalámbrica, se puede presentar como ruido térmico, que es

producido por el movimiento libre de los electrones en un resistor que se encuentra en los componentes electrónicos, de la misma forma, un fenómeno producido por un número incierto de electrones que cruzan por la juntura de un semiconductor se denomina ruido de disparo, el ruido se modela como una señal aditiva que contamina las señales de un sistema de comunicación y se modela como una variable aleatoria de tipo Gaussiana.

#### 1.4.2 Desvanecimiento

El desvanecimiento es un fenómeno que afecta la transmisión de datos en redes inalámbricas. La señal transmitida puede o no llegar al receptor de una manera directa como se muestra en la Figura 5. Además, existen varias réplicas de la señal que son afectadas por distintas atenuaciones que llegan al receptor. Este fenómeno se presenta en diferentes tipos como el desvanecimiento Rayleigh y desvanecimiento Rice, para escenarios sin y con línea de vista respectivamente.



*Figura 5.* Representación gráfica de desvanecimiento.

Tomado de: (Krouk & Semenov, 2011)

### 1.4.3 Desvanecimiento Rayleigh

Este desvanecimiento aparece porque el receptor no tiene una línea de vista directa con el transmisor, lo que hace que las ondas electromagnéticas choquen sobre cuerpos opacos produciendo que la amplitud de la señal fluctúe a lo largo del tiempo.

La función de densidad de probabilidad (PDF) de la distribución Rayleigh es el resultado de la raíz cuadrada de dos variables aleatorias Gaussianas al cuadrado con media cero y varianza  $\sigma^2$ . Estas variables aleatorias son independientes y distribuidas idénticamente. La PDF se puede expresar como la Ecuación 6 (Papoulis & Pillai, 2002) de la siguiente manera:

$$f(\alpha) = \frac{\alpha}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{\alpha^2}{2\sigma^2}\right), \quad \alpha \geq 0.$$

(Ecuación 6)

En la Figura 6 se muestra la PDF de la distribución Rayleigh con diferentes valores de  $\sigma^2$  verificando que a medida que la varianza aumenta el pico de la PDF disminuye su valor y se desplaza sobre el eje X.

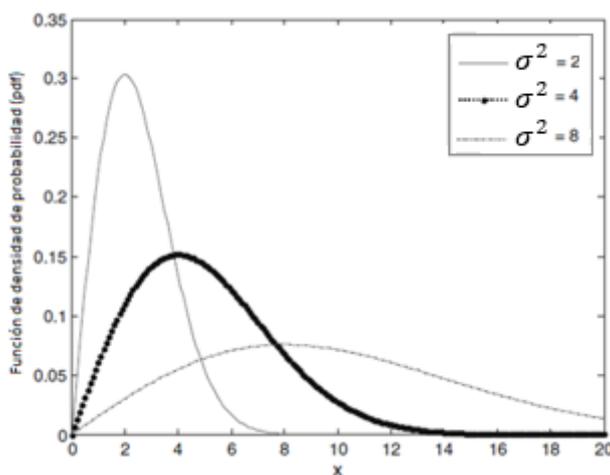


Figura 6. Distribución Rayleigh para tres valores de varianza.

Adaptado de: (Shankar, 2017)

#### 1.4.4 Desvanecimiento Rice

El desvanecimiento Rice aparece de la misma forma que el desvanecimiento Rayleigh, con la diferencia de que en este escenario existe también una línea de vista entre el receptor y el transmisor.

La PDF de la variable aleatoria Rice puede ser expresada matemáticamente de la siguiente manera (Wongtrairat & P Supnithi, 2011):

$$P_R(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2+s^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{rs}{\sigma^2}\right), r \geq 0,$$

(Ecuación 7)

dónde  $s^2$  es la potencia del componente especular o componente con línea de vista,  $2\sigma^2$  es la potencia de los componentes dispersos e  $I_0$  es la función modificada de Bessel de primer tipo y orden cero, representada en su forma integral como (Hua Fu & Pooi-Yuen Kam, 2011):

$$I_0(x) = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \exp(x \cos \theta) d\theta,$$

(Ecuación 8)

Además, la función modificada de Bessel puede ser escrita en términos de  $\nu$  de la siguiente manera (Arfken & Weber, 2005):

$$I_\nu(x) = \left(\frac{x}{2}\right)^\nu \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\left(\frac{x^2}{4}\right)^k}{k! \Gamma(\nu+k+1)},$$

(Ecuación 9)

dónde la función gamma está definida por Euler como (JR Vaz & Capelas De Oliveira, 2016):

$$\Gamma(z) = \int_0^{\infty} e^{-t} t^{z-1} dt, \quad \Re(z) > 0.$$

(Ecuación 10)

Además, se puede escribir la función gamma en su definición de Gauss de la siguiente manera (JR Vaz & Capelas De Oliveira, 2016):

$$\Gamma(z) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n! n^z}{z(z+1)\dots(z+n)}, \quad z \neq 0, -1, -2, \dots,$$

(Ecuación 11)

Además, la PDF puede ser escrita en términos del factor K, donde K se define como (Wongtrairat & P Supnithi, 2011):

$$K = \frac{s^2}{2\sigma^2},$$

(Ecuación 12)

y es la razón entre la potencia de la señal con línea de vista o componentes especulares y la potencia de los componentes dispersos.

De esta forma la relación de potencia de los componentes especulares y los componentes dispersos puede ser escrita como (Wongtrairat & P Supnithi, 2011):

$$s^2 = \frac{K\Omega}{K+1},$$

(Ecuación 13)

$$2\sigma^2 = \frac{\Omega}{K+1},$$

(Ecuación 14)

dónde  $\Omega$  es la suma de las potencias es decir  $s^2 + 2\sigma^2$ , de esta manera la PDF se escribe en términos de K en la Ecuación 15 (Wongtrairat & P Supnithi, 2011) de la siguiente forma:

$$P_R(r) = \frac{2r(K+1)}{\Omega} \exp\left(-K - \frac{r^2(K+1)}{\Omega}\right) I_0\left(2r\sqrt{\frac{K(K+1)}{\Omega}}\right),$$

(Ecuación 15)

La Figura 7 muestra las PDFs del desvanecimiento tipo Rice con diferentes factores de K, expresado en dB.

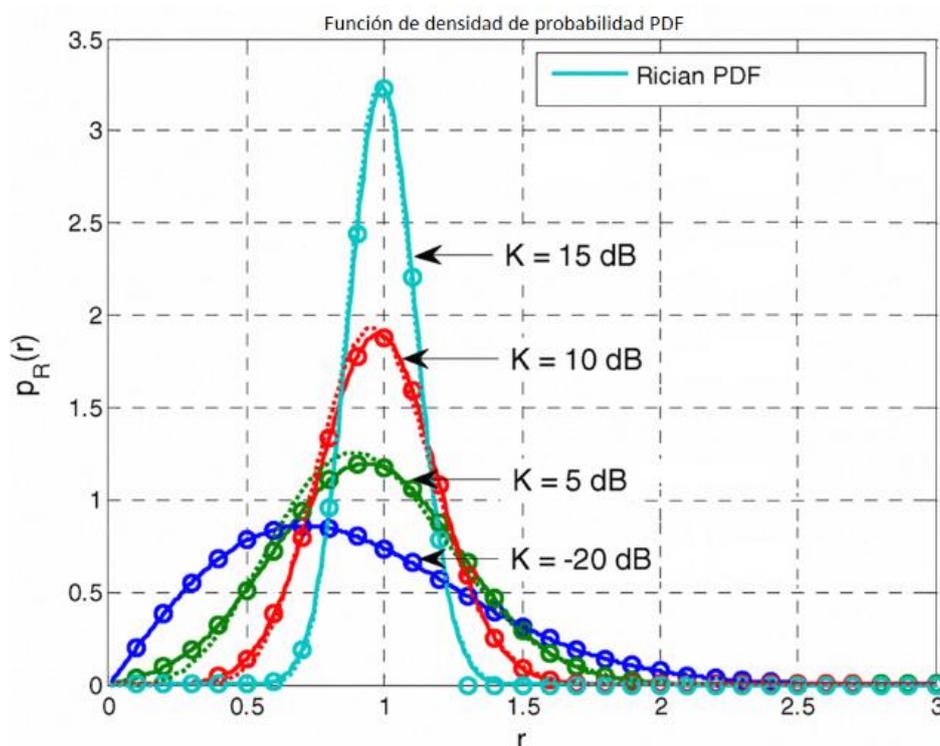


Figura 7. PDF de desvanecimiento tipo Rice para cuatro valores de K.

Tomado de: (Wongtrairat & P Supnithi, 2011)

### 1.5 Eficiencia Espectral

La eficiencia espectral se define como el número máximo de transmisiones coexistentes que utilizan el mismo canal al mismo tiempo, es decir es un

parámetro que cuantifica la tasa de información que puede transmitirse en un determinado ancho de banda que utiliza un espectro de frecuencia limitado.

En sistemas de transmisión inalámbricos, la eficiencia espectral se puede definir como la relación entre la tasa de bits ( $R_b$ ) y el ancho de banda total del sistema ( $B$ ) y permite establecer la eficiencia de uso del ancho de banda.

El período de transmisión de un símbolo ( $T_s$ ) está dado por (Orozco N., 2014):

$$R_b = \frac{\log_2 M}{T_s} \quad \text{bits/s},$$

(Ecuación 16)

dónde  $M$  es el orden de la modulación y de acuerdo al criterio de Nyquist el ancho de banda se define de la siguiente forma (Orozco N., 2014):

$$B = \frac{1}{T_s} \quad \text{Hz},$$

(Ecuación 17)

por tanto, la eficiencia espectral de un sistema de comunicación inalámbrico es (Orozco N., 2014):

$$\epsilon = \frac{R_b}{B} = \log_2 M \quad \text{bits/s /Hz},$$

(Ecuación 18)

## 1.6 Probabilidad de Error de Bit Media (BER media)

En los distintos sistemas de transmisión digital, la probabilidad de error de bit (BER) es la relación entre los bits modificados debido a errores de transmisión y el número total de bits transmitidos. Los errores se presentan por diferentes factores como el ruido, desvanecimiento o interferencia en el canal. La BER es inversamente relacionada con la relación señal-ruido (SNR) del sistema. Es decir, una mayor SNR implica una BER menor.

$$\text{BER}_{\text{media}} = \frac{\text{Número de bits erróneos}}{\text{Números de bits transmitidos}},$$

(Ecuación 19)

### 1.6.1 Probabilidad de Error de Bit en Canales AWGN

En los canales con ruido aditivo blanco Gaussiano (AWGN), la BER se puede analizar utilizando la denominada SNR normalizada ( $E_b/N_0$ ) dónde  $E_b$  puede ser escrito como la potencia en un intervalo de tiempo de bit  $T_b$ , es decir  $ST_b$ , dónde  $S$  es la potencia y  $N_0$  como la potencia de ruido  $N$  sobre el ancho de banda  $B$  como se muestra en la Ecuación 20 (Orozco N., 2014):

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{ST_b}{N/B},$$

(Ecuación 20)

para analizar el desempeño de un sistema de comunicación digital, en determinados esquemas de modulación donde la relación  $E_b/N_0$  debe ser la mayor posible para garantizar que la probabilidad de error en el esquema de modulación cumpla estándares de calidad de servicio.

La probabilidad de error de símbolo para las distintas derivaciones de la modulación M-QAM en un canal con ruido se define en la Ecuación 21 (Orozco N., 2014) de la siguiente manera:

$$P_s = \frac{2(\sqrt{M}-1)}{\sqrt{M}} \text{erfc} \left( \sqrt{\frac{3 \log_2 M}{2(M-1)} * \frac{Eb}{No}} \right),$$

(Ecuación 21)

dónde  $M$  es el orden de la modulación y  $\text{erfc}$  es la función de error complementaria definida por (Papoulis & Pillai, 2002):

$$\text{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} \exp(-t^2) dt,$$

(Ecuación 22)

### 1.6.2 Probabilidad de Error de Bit Media en Canales con Desvanecimiento

En un canal con desvanecimiento, la probabilidad de error de bit instantánea varía porque la relación señal a ruido también varía con el tiempo. Específicamente la SNR instantánea es (Orozco N., 2014):

$$\gamma = \alpha^2 \frac{E_b}{N_0},$$

(Ecuación 23)

Dónde  $\alpha$  es una variable aleatoria Rice que representa la amplitud instantánea del desvanecimiento.

La BER media se obtiene promediando las estadísticas de desvanecimiento a través de (Carvajal H.,2018):

$$\bar{P}_b = \int_0^{\infty} P(b|\gamma_s) f(\gamma_s) d\gamma_s,$$

(Ecuación 24)

dónde  $P(b|\gamma_s)$  es la BER condicionada en la SNIR instantáneo y  $f(\gamma_s)$  es la PDF del SNIR.

## 2 DISEÑO Y DESARROLLO DE UN SISTEMA OPORTUNISTA CON DESVANECIMIENTO TIPO RICE EMPLEANDO MODULACIONES CUADRADAS Y NO CUADRADAS

### 2.1 Introducción

Debido a la creciente demanda y la evolución tecnológica, los sistemas de comunicación inalámbricos poseen ventajas como la portabilidad. El usuario fijo o móvil tiende a estar conectado a un sistema que le permita tener una velocidad de conexión adecuada para sus distintas necesidades. Sin embargo, la transmisión de datos en los sistemas inalámbricos puede verse afectada por distintos factores como interferencia, ruido y desvanecimiento, factores que pueden afectar la fiabilidad de los datos transmitidos. Por lo indicado, en este

capítulo se presenta el diseño y desarrollo de un sistema oportunista, el cuál aprovecha el desvanecimiento. Específicamente para realizar la transmisión en momentos más beneficiosos para la señal. En este proyecto se considera un canal de desvanecimiento tipo Rice y se emplean modulaciones QAM cuadradas y no cuadas. Como resultado, se realizará un análisis, cuantificando los bits erróneos recibidos (BER), en diferentes escenarios de modulación como por ejemplo 4-QAM, 8-QAM, 16-QAM, 32-QAM, 64-QAM, 128-QAM y 256-QAM. Así mismo, se verifica el desempeño del sistema oportunista comparando los resultados con aquellos de un sistema de comunicación ordinario.

## 2.2 Descripción del Sistema

En un sistema de transmisión oportunista, la transmisión de la información solo se realiza cuando la amplitud del desvanecimiento se encuentra por encima de un determinado umbral. Para que esto suceda, el receptor conoce el estado del canal y notifica los instantes en que el transmisor debe enviar la información. Este proceso se realiza usando un enlace de retroalimentación.

En un sistema oportunista, la BER tiene decaimiento exponencial cuando la SNR aumenta (Orozco N., 2014). Este comportamiento lo hace atractivo pues, consigue eliminar al desvanecimiento casi en su totalidad (Orozco N., 2014).

En la Figura 8 se muestra un diagrama de bloques del sistema de transmisión oportunista. Dónde, inicialmente, se generan los bits aleatoriamente con la misma probabilidad. Posteriormente, los bits se mapean en símbolos complejos ( $x_k$ ) considerando la codificación de Gray. Se asume que la energía de los símbolos esta normalizada, es decir,  $E[x_k^2] = 1$ . El símbolo  $x_k$  en la salida del mapeador toma un formato de pulso que satisface el criterio de Nyquist antes de ser modulado.

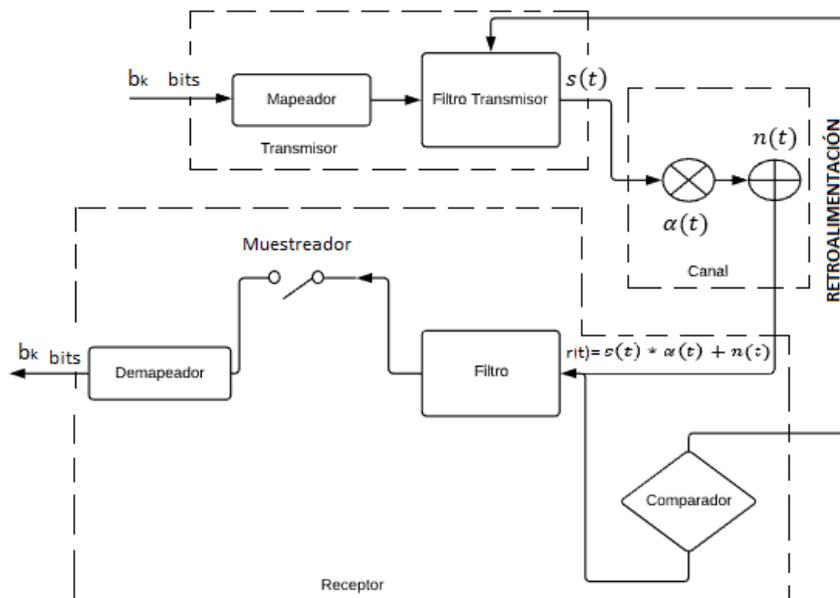


Figura 8. Diagrama de bloques de un sistema oportunista

La señal transmitida se expresa (Orozco & de Almeida, 2013) de la siguiente manera:

$$s(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} Ax_{0,k}g(t - kT_s),$$

(Ecuación 25)

dónde  $A$  es la amplitud de la señal,  $g(t - kT_s)$  es el formato de pulso con una energía unitaria,  $\frac{1}{T_s}$  es decir  $\int_0^{T_s} g^s(t - kT_s)dt = 1$  y  $T_s$  es el periodo del símbolo.

La señal de salida, en el canal se multiplica por el desvanecimiento  $\alpha(t)$ . Luego, en el receptor se adiciona ruido  $n(t)$ . Por lo tanto, la señal en el receptor se presenta de la siguiente forma  $r(t) = s(t) * \alpha(t) + n(t)$ .

El receptor, mediante un comparador, verifica si el desvanecimiento se encuentra por encima del umbral ( $m$ ). A través del enlace de retroalimentación, se indica al transmisor que envíe la señal.

Esta señal es recibida en un filtro que maximiza la relación señal a ruido. Este filtro se le conoce como filtro cavado. Luego, mediante el muestreador, se

obtiene muestra de la señal recibida que se envía al demapeador, el cual decide por el símbolo transmitido.

### 2.3 Transmisión oportunista empleando modulaciones cuadradas y no cuadradas

El mecanismo de transmisión de un sistema oportunista se lo realiza de la siguiente forma: el receptor, mediante un enlace directo con el transmisor, se encarga de retroalimentar la información del comparador, el cual compara si la amplitud del desvanecimiento se encuentra por encima del umbral  $m$ .

En este evento, el transmisor envía la información conforme se muestra en la Figura 9.

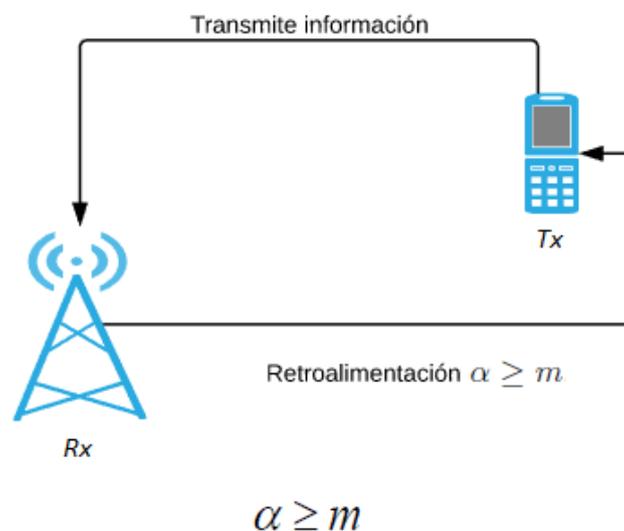


Figura 9. Desvanecimiento por encima del umbral.

Por el contrario, en la Figura 10 se observa el otro escenario en el cual el transmisor conoce, mediante la retroalimentación del receptor, que la amplitud del desvanecimiento es menor al umbral. Por tanto, el transmisor no transmite la información. Sin embargo, esos datos son almacenados en un buffer para su posterior transmisión.

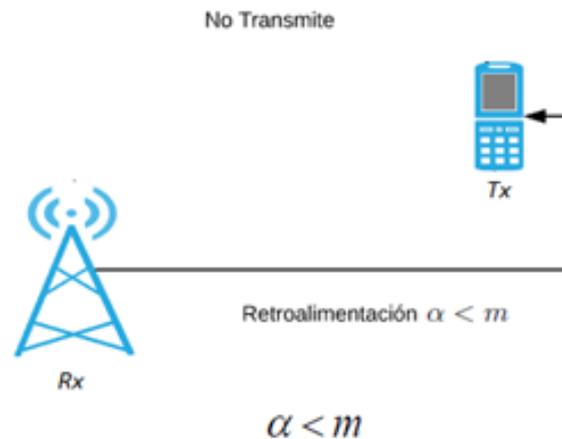


Figura 10. Desvanecimiento por debajo del umbral.

## 2.4 Cálculo del umbral

El cálculo del umbral permite establecer el desempeño del sistema oportunista para diferentes escenarios. Para esto se considera la PDF de la variable aleatoria Rice, la cual se indica en la Ecuación 7.

Así, en primer lugar, podemos determinar la probabilidad de no transmisión de la siguiente manera:

$$P = \int_0^m \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2+s^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{rs}{\sigma^2}\right) dr, \quad (\text{Ecuación 26})$$

Se conoce que cuando se integra la PDF desde el límite inferior de los valores que toma la variable aleatoria hasta un valor  $m$ , se obtiene como resultado la función de densidad acumulativa (CDF) evaluada en  $m$ , que es la probabilidad de no de transmisión. Si  $q$  es la probabilidad de transmisión y  $p$  es probabilidad de no transmisión en un sistema oportunista, entonces podemos escribir que:

$$p + q = 1, \quad (\text{Ecuación 27})$$

la CDF puede ser escrita en función de la función Q-Marcum esto es (Lindsey, 1964):

$$P = 1 - Q_1\left(\frac{s}{\sigma}, \frac{m}{\sigma}\right),$$

(Ecuación 28)

dónde  $Q_1\left(\frac{s}{\sigma}, \frac{m}{\sigma}\right)$  viene dada por (Lindsey, 1964):

$$Q_1\left(\frac{s}{\sigma}, \frac{m}{\sigma}\right) = \int_{m/\sigma}^{\infty} x \exp\left(-\frac{x^2 + (s/\sigma)^2}{2}\right) I_0((s/\sigma)x) dx$$

(Ecuación 29)

Para obtener los valores del umbral  $m$  a partir de la Ecuación 28, se debe calcular la función Q-Marcum inversa. No obstante, este es un proceso complejo.

Por lo tanto, podemos utilizar un proceso recursivo empleando la función “*marcumq*” en Matlab, para encontrar dichos valores de ( $m$ ). La Tabla 1, muestra las probabilidades de transmisión y no transmisión para un sistema oportunista con un canal de desvanecimiento tipo Rice con el respectivo valor de umbral. Estos valores se parametrizan para diferentes valores de  $s$ . Además, se consideró que la potencia media de los trayectos sin línea de vista fue normalizada, esto es  $2\sigma^2 = 1$ .

Tabla 1

*Umbrales considerados en el análisis del proyecto.*

Valor de umbral [ $m$ ]	Valores de media [ $s$ ]			Probabilidad de transmisión [ $q$ ]	Probabilidad de no transmisión [ $p$ ]
	0	0.5	1		
$m_1$	0.8325	0.9379	1.2437	1/2	1/2
$m_2$	1.0481	1.1773	1.5193	1/3	2/3
$m_3$	1.1774	1.3199	1.6787	1/4	3/4
$m_4$	1.2686	1.4202	1.7890	1/5	4/5

## 2.5 Cálculo de la eficiencia espectral

En la Figura 11 se observa una comparación de un sistema de transmisión ordinario y un sistema de transmisión oportunista considerando una probabilidad de transmisión de  $q = 1/2$ . En este escenario, la velocidad de transmisión de los bits oportunistas y la velocidad de la transmisión normal son las mismas, pero la eficiencia espectral del esquema oportunista es la mitad. Específicamente, mientras en la transmisión normal se transmite un símbolo, en la transmisión oportunista se transmiten dos símbolos en el mismo instante de tiempo. Esto implica el uso del doble del ancho de banda. Sin embargo, para tener la misma eficiencia espectral, es necesario cambiar el esquema de modulación en la transmisión oportunista. Por ejemplo, una transmisión ordinaria BPSK tiene la misma eficiencia espectral que una transmisión oportunista QPSK ó 4-QAM.

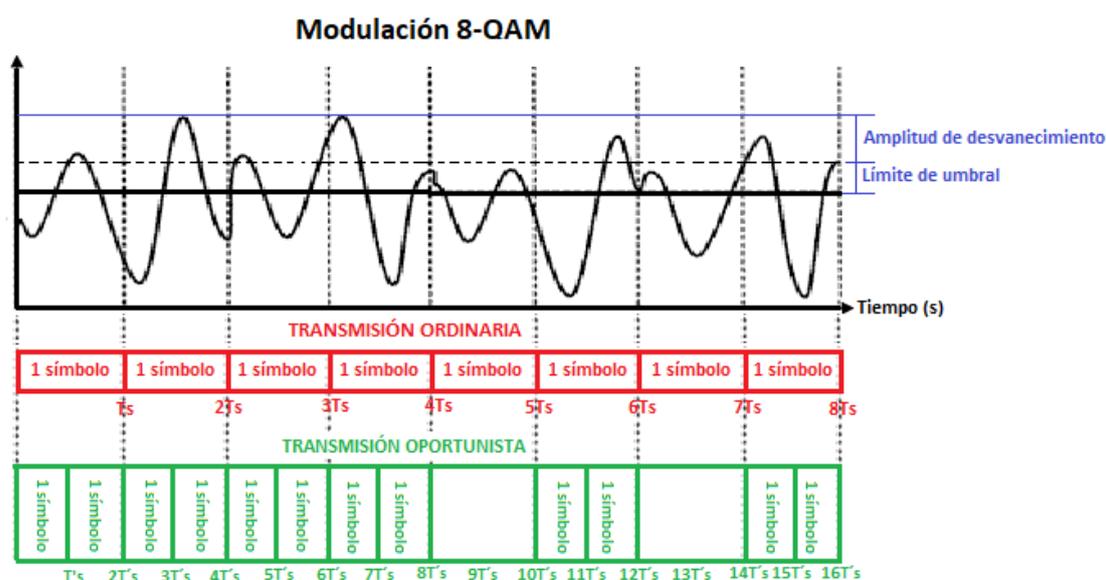


Figura 11. Comparación de un sistema de transmisión ordinario y oportunista con probabilidad de transmisión  $q = 1/2$ .

Adoptado de: (Orozco & de Almeida, 2013)

Para la transmisión ordinaria, el intervalo de tiempo de símbolo es  $T_s$  y la velocidad de bits  $R_b$  es (Orozco & De Almeida, 2013):

$$R_b = \frac{\log_2 M}{T_s},$$

(Ecuación 30)

dónde  $M$  es el orden de la modulación. El ancho de banda es  $B = 1/T_s$ . En consecuencia, la eficiencia espectral se determina como (Orozco & De Almeida, 2013):

$$\epsilon = \frac{R_b}{B} = \log_2 M.$$

(Ecuación 31)

Para el sistema de transmisión oportunista el intervalo del tiempo de símbolo es  $T_s = q * T_s'$  para mantener la misma eficiencia y la velocidad de bits viene dada por (Orozco & De Almeida, 2013):

$$R_b = \frac{q}{T_s} * \log_2 M = \frac{\log_2 M}{T_s'},$$

(Ecuación 32)

El ancho de banda en un sistema oportunista viene dado por  $B = 1/T_s'$ . De esta manera, la eficiencia espectral es (Orozco & De Almeida, 2013):

$$\epsilon = \frac{R_b}{B} = (1 - p) * \log_2 M,$$

(Ecuación 33)

## 2.6 Probabilidad de error de bit de un sistema oportunista que emplea modulaciones QAM cuadradas y no cuadradas

En la sección 1.8.2 se indicó como se realiza el cálculo de la probabilidad de bit en canales con desvanecimiento. En un sistema de transmisión oportunista, ese cálculo se realiza en términos del umbral  $m$ . De esta forma, la probabilidad de error de símbolo media de un sistema oportunista puede ser calculada de la siguiente forma:

$$\bar{P}_s = \int_m^\infty P_{(s|\alpha)}(\alpha) f_\alpha(\alpha | \alpha > m) d\alpha,$$

(Ecuación 34)

dónde  $P_{(s|\alpha)}(\alpha)$ , es la probabilidad de error de símbolo condicionada a un valor de desvanecimiento instantáneo en un canal AWGN que viene dada por

$$\bar{P}_s = \frac{2(\sqrt{M}-1)}{\sqrt{M}} \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{3 \log_2 M}{2(M-1)}} * \alpha^2 \frac{Eb}{No} \right),$$

(Ecuación 35)

y  $f_\alpha(\alpha|\alpha > m)$  es la PDF del desvanecimiento condicionada a que el mismo se encuentre sobre un umbral, que es la razón de la PDF del desvanecimiento tipo Rice y la CDF, presentada como:

$$\bar{P}_s = \frac{\frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2+s^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{rs}{\sigma^2}\right)}{1 - Q_1\left(\frac{s}{\sigma}, \frac{m}{\sigma}\right)},$$

(Ecuación 36)

## 2.7 Diseño del algoritmo para simulación

En esta sección se establecerán los lineamientos necesarios para simular un sistema oportunista, que emplea modulaciones cuadradas y no cuadradas en un canal con desvanecimiento de tipo Rice.

Como se mencionó en la sección 1.6.2, en el desvanecimiento de tipo Rice, la potencia total del desvanecimiento se compone de la potencia del componente especular o línea de vista, y la potencia de los componentes aleatorios o dispersos. La amplitud del componente especular implica la generación de una variable aleatoria Gaussiana con media distinta de cero, mientras que la amplitud de los componentes dispersos es una variable aleatoria Gaussiana con media igual a cero.

Por lo indicado en el simulador, se generan dos variables aleatorias Gaussianas  $x$  y  $y$ , donde la variable aleatoria  $x$  modela el componente de línea de vista y la variable aleatoria  $y$  modela los componentes dispersos. Como se indicó anteriormente el componente  $x$  tiene una media diferente de cero  $m_1 = s$  mientras que el componente  $y$  tiene media cero  $m_2 = 0$  y ambas tienen una

desviación estándar de ( $\sigma$ ). Entonces el canal Rice se lo puede modelar como una variable aleatoria Gaussiana compleja  $x + jy$ , donde  $j = \sqrt{-1}$ .

Específicamente el desvanecimiento de tipo Rice es la norma (envolvente) de dicha variable aleatoria completa, esto es:

$$s = \sqrt{m_1^2 + m_2^2},$$

(Ecuación 37)

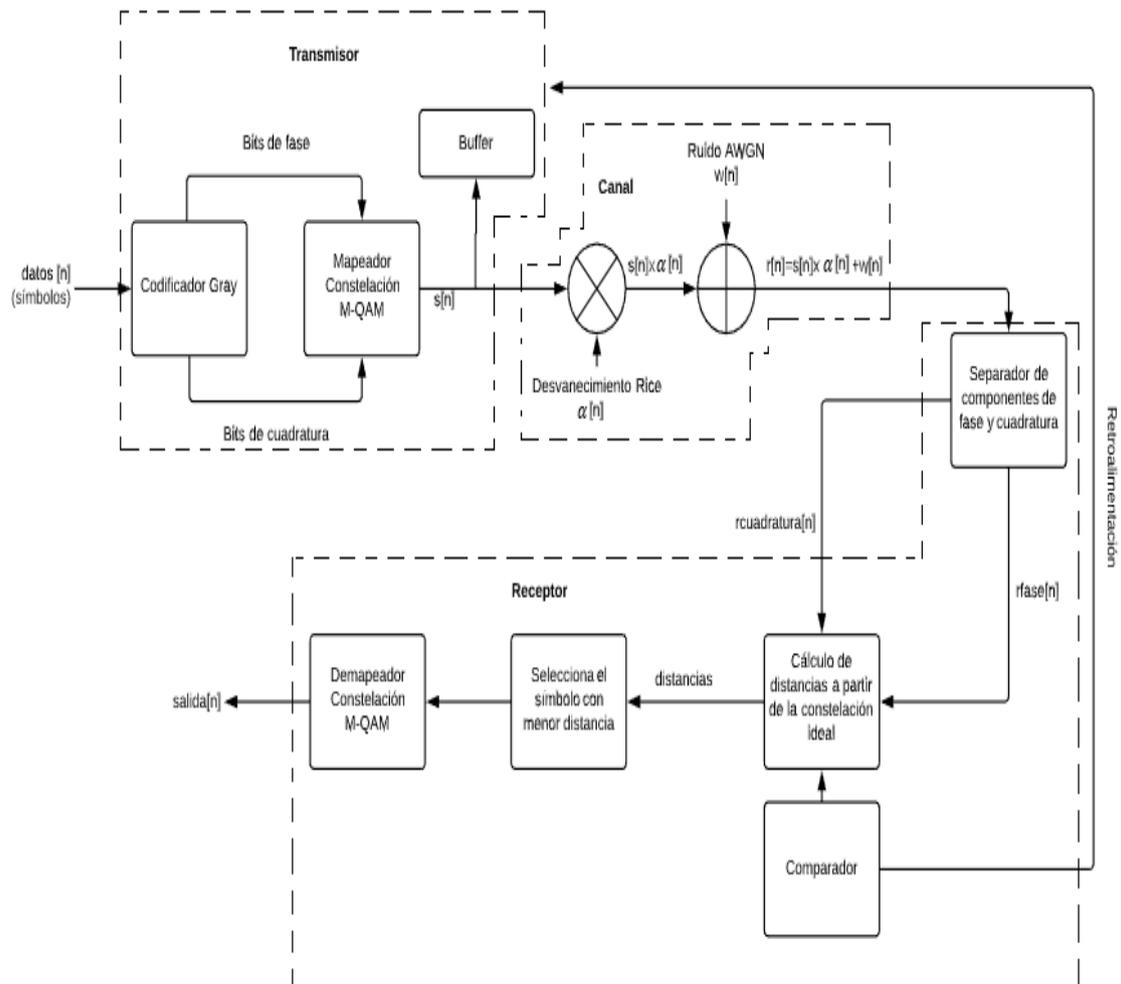
El parámetro de media no central es causado por una presencia de un trayecto con línea de vista. Para la simulación se debe formular los parámetros de media y varianza en términos del factor K, como se mostró en la Ecuación 9.

En Matlab la función “*randn*” genera números aleatorios gaussianos con media 0 y desviación estándar 1. Por tanto, para generar el componente  $x$  con media  $m_1 = s$  y desviación estándar  $\sigma$ , la salida de *rand* se debe multiplicar por ( $\sigma$ ) y sumarle  $s$ . Para el componente  $y$  con media  $m_2 = 0$  y desviación estándar  $\sigma$ , la salida de *rand* se debe multiplicar por un número complejo ( $j$ ) y por ( $\sigma$ ), esta operación se realiza con el fin de generar el componente especular y el componente de dispersión media para modelar el canal de Rice.

M-QAM es una técnica de modulación, donde la información esta codificada tanto en fase como en cuadratura. Los símbolos adyacentes en la constelación del transmisor no deberían diferir en más de un bit, (Codificación de Gray). Además, para obtener una comparación equitativa entre todas las modulaciones la energía de bit debe ser normalizada en todos los casos.

Todo el proceso descrito antes se resume en la Figura 12, adicional en el transmisor existe un buffer que se encarga de almacenar la información que no se transmite cuando el desvanecimiento está por debajo del umbral, para constatar esto el receptor tiene un comparador con un enlace directo al transmisor y retroalimenta al transmisor si la amplitud del desvanecimiento está por encima o por debajo del umbral de transmisión, para proceder a realizar el envío de la información, esta información es enviada a un circuito donde se

calcula la distancia euclidiana de cada símbolo a partir de una constelación ideal, con la distancia medida se procede a seleccionar el símbolo con menor distancia para posteriormente pasar por el demapeador y obtener a la salida la señal original transmitida.



*Figura 12.* Diagrama en bloques de un esquema de modulación M-QAM

En Matlab, la función “*qammod*” permite realizar el mapeo de bits en símbolos en una modulación M-QAM. Así, devuelve una señal modulada en fase y cuadratura con la señal de entrada dada (bits) y el orden de la modulación indicado. Esto facilita la escritura del algoritmo de simulación. Para la verificar que el simulador fue implementado correctamente, se puede utilizar la herramienta de Matlab “*Bit Error Rate Analysis Tool*”.

Esta herramienta permite graficar la curva de la BER teórica ingresando los parámetros propios que la herramienta solicita. Como se puede observar en la Figura 13, la herramienta permite escoger el tipo de canal que utiliza el sistema de transmisión sea este canal AWGN, con desvanecimiento de tipo Rayleigh o desvanecimiento de tipo Rice. Si se escoge desvanecimiento Rice, entonces la herramienta solicita el factor K. Además, permite introducir el parámetro de orden de diversidad, que implica el número de antenas de recepción.

La herramienta también permite escoger los diferentes esquemas de modulación como, por ejemplo: PSK (del inglés: *Phase Shift Keying*), DPSK (del inglés: *Differential Phase Shift Keying*), QPSK (del inglés: *Quadrature Phase Shift Keying*), PAM (del inglés: *Pulse-Amplitude Modulation*), QAM (del inglés: *Quadrature Amplitude Modulation*), FSK (del inglés: *Frequency Shift Keying*), MSK (del inglés: *Minimum-shift keying*), CPFSK (del inglés: *Continuous-phase frequency-shift keying*), en QAM permite escoger el orden de la modulación y la herramienta grafica la curva teórica de la BER a partir de los datos ingresados.

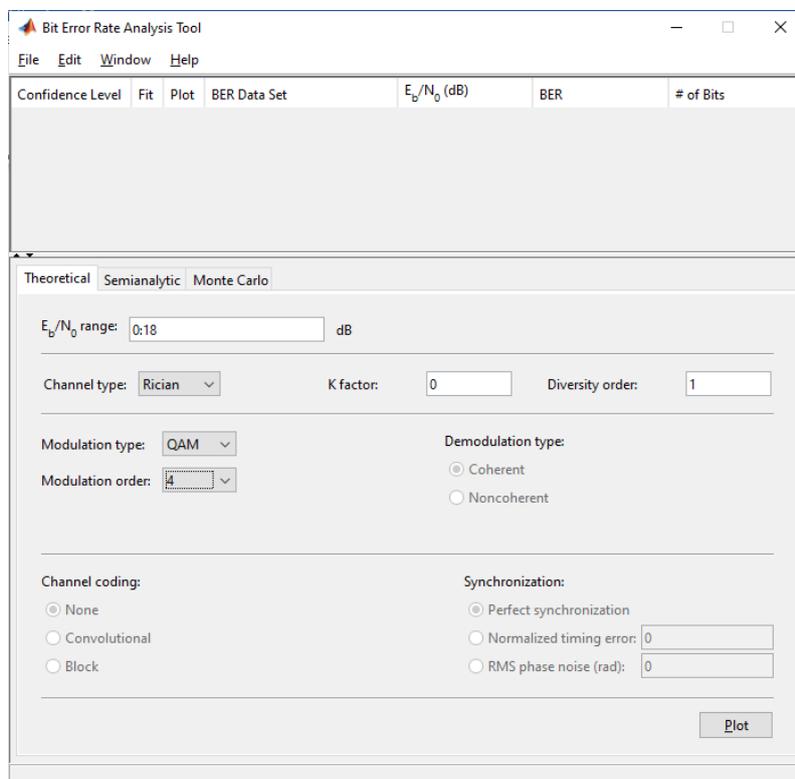


Figura 13. Ventana de herramienta Bit Error Rate Analysis Tool

### 3 ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS

En el presente capítulo se realiza el análisis y comparación del desempeño considerando diferentes esquemas de modulación, en un sistema de transmisión oportunista. Para esto se consideran modulaciones cuadradas (S-QAM) como 4-QAM, 16-QAM, 64-QAM y 256-QAM y modulaciones no cuadradas (NS-QAM) como 8-QAM, 32-QAM y 128-QAM. Se considera que el sistema opera en un canal con desvanecimiento de tipo Rice y para el análisis se establecen tres umbrales de transmisión  $m_1 = 0,8325$  con factor  $K=0$ ,  $m_2 = 0,9379$  con factor  $K=0,25$  y  $m_3 = 1,2437$  con factor  $K=1$ , los cuales fueron indicados en la Tabla 1.

El análisis del desempeño se realiza graficando las curvas de la BER en función del  $E_b/N_o$ . De esta manera, se realizará además las comparaciones del desempeño del sistema con diferentes esquemas de modulación S-QAM y NS-QAM. Además, se realizarán comparaciones del desempeño del sistema considerando distintos valores de umbral.

#### 3.1 Análisis de la BER con modulaciones S-QAM

El análisis de la BER se realiza con modulaciones S-QAM y considerando un valor de umbral de  $m = 0,8325$  y un canal con factor  $K=0$ , es decir, los resultados de este umbral se consideran en un sistema de transmisión oportunista con desvanecimiento tipo Rayleigh. La Figura 14 muestra la BER en función de  $E_b/N_o$  y parametrizado por el tipo de modulación. En la figura se observa que, cuando la relación señal a ruido aumenta el desempeño del sistema mejora. Además, se puede observar que la BER disminuye de forma exponencial. Esto es debido a que efectos como el desvanecimiento son mitigados en sistemas de transmisión oportunista. Por otra parte, el desempeño del sistema empeora si el orden de la modulación aumenta.

La Figura 15 muestra el desempeño de un sistema de transmisión oportunista con un umbral  $m = 0,9379$  y factor  $K=0,25$ , se observa que a medida que valor del umbral y el factor  $K$  aumenta mejora el desempeño del sistema.

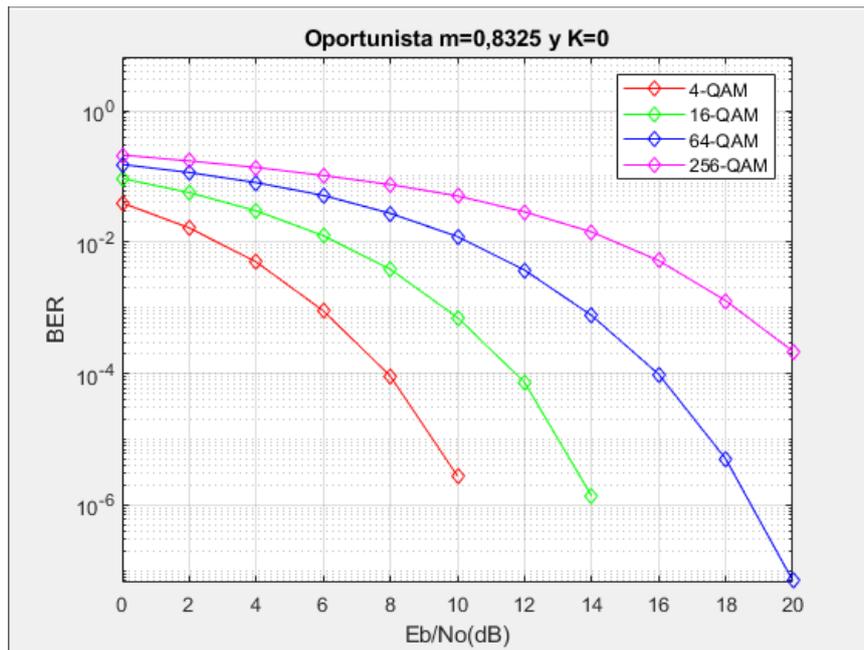


Figura 14. BER en función de  $E_b/N_o$  para un sistema oportunista que usa diferentes modulaciones S-QAM y umbral  $m = 0,8325$  en un canal Rice y factor  $K=0$ .

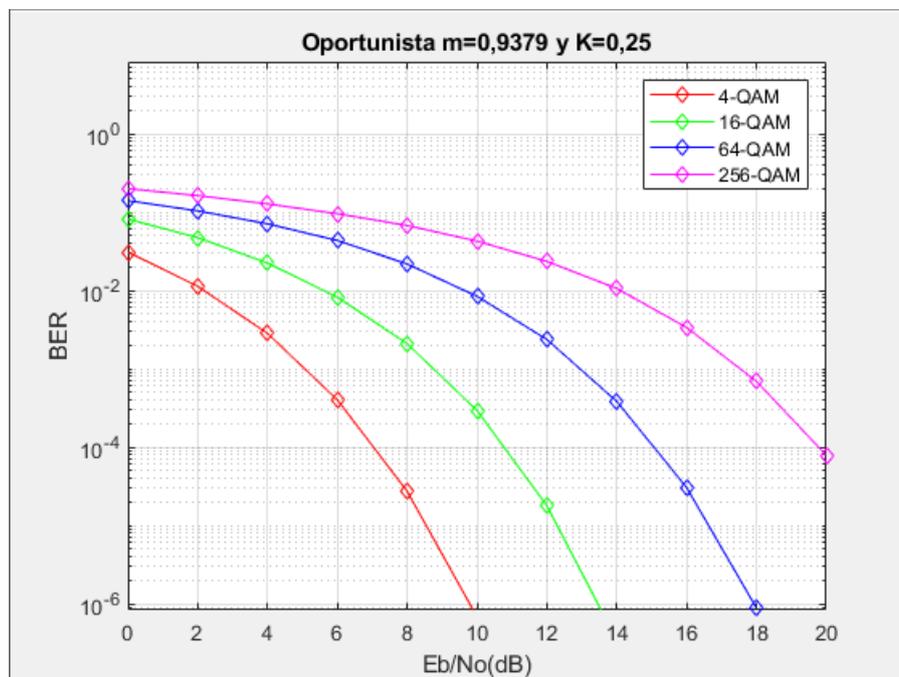


Figura 15. BER en función de  $E_b/N_o$  para un sistema oportunista que usa diferentes modulaciones S-QAM y umbral  $m = 0,9379$  en un canal Rice y factor  $K=0,25$ .

La Figura 16 muestra la BER en función de  $E_b/N_o$  de un sistema oportunista con umbral  $m = 1,2437$  y canal Rice con factor  $K=1$ . Es posible observar que cuando la relación señal a ruido aumenta se obtienen los valores de BER más bajos cuando se los compara con los resultados de las Figuras 14 y 15. Pues un factor  $K$  mayor implica mayor potencia del canal y además, un umbral mayor implica mayor amplitud de transmisión, un punto que vale la pena mencionar de las modulaciones S-QAM, es que requieren una menor capacidad de procesamiento por parte del receptor ya que al ser una constelación cuadrada facilita la capacidad de detección del receptor.

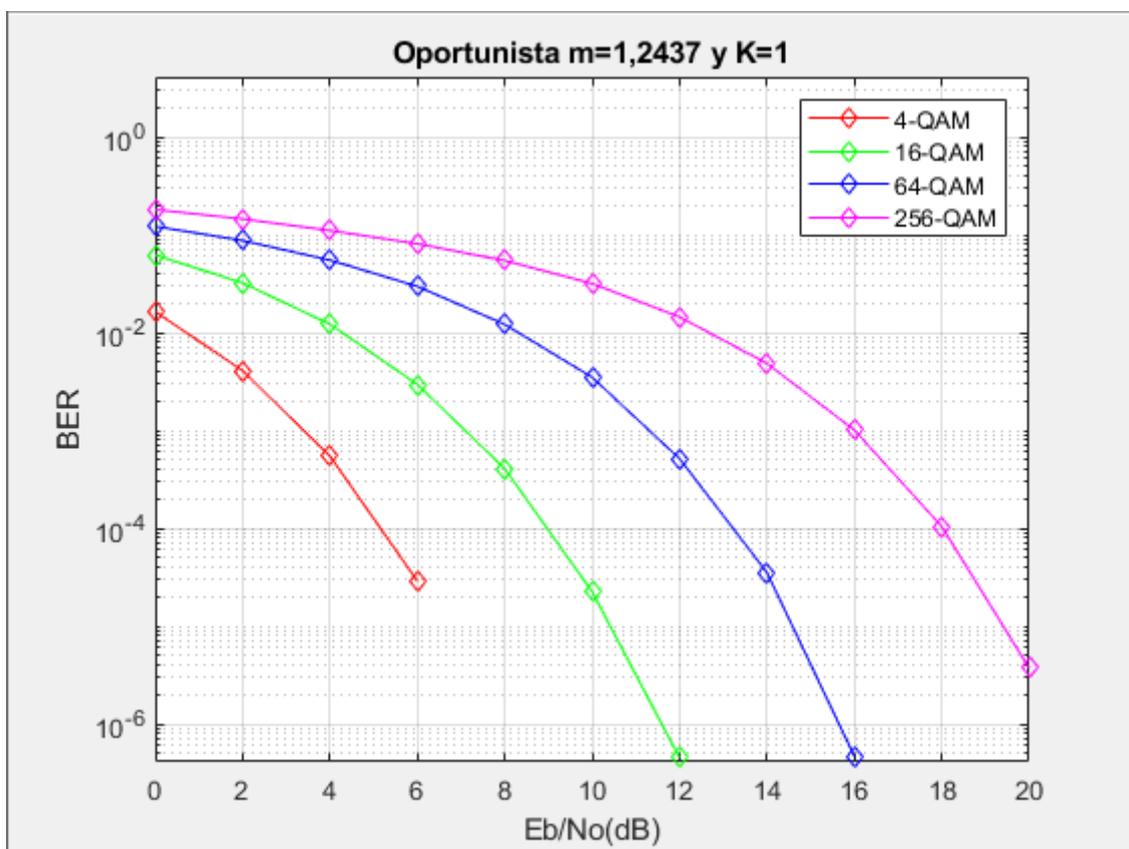


Figura 16. BER en función de  $E_b/N_o$  para un sistema oportunista que usa diferentes modulaciones S-QAM y umbral  $m = 1,2437$  en un canal Rice y factor  $K=1$ .

En la Figura 17 se muestra la BER en función de  $E_b/N_o$  para un sistema oportunista que usa el esquema de modulación 4-QAM con tres umbrales distintos de transmisión de transmisión  $m_1 = 0,9379$ ,  $m_2 = 1,1773$  y  $m_3 = 1,3199$  considerando un canal Rice con factor  $K=0,25$ , donde se puede observar que

mientras el valor umbral aumenta consecuentemente el desempeño del sistema mejora, por ejemplo con el primer umbral de transmisión la BER es de  $0,0003784$  en un  $E_b/N_o$  de 6 dB, mientras que en el segundo umbral de transmisión la BER es de  $3,982 \times 10^{-5}$  en un  $E_b/N_o$  de 6 dB y en el último umbral la BER es de  $9,153 \times 10^{-6}$  en un  $E_b/N_o$  de 6 dB, por tanto, como con un umbral mayor se obtiene menos valores de BER el desempeño del sistema es mejor.

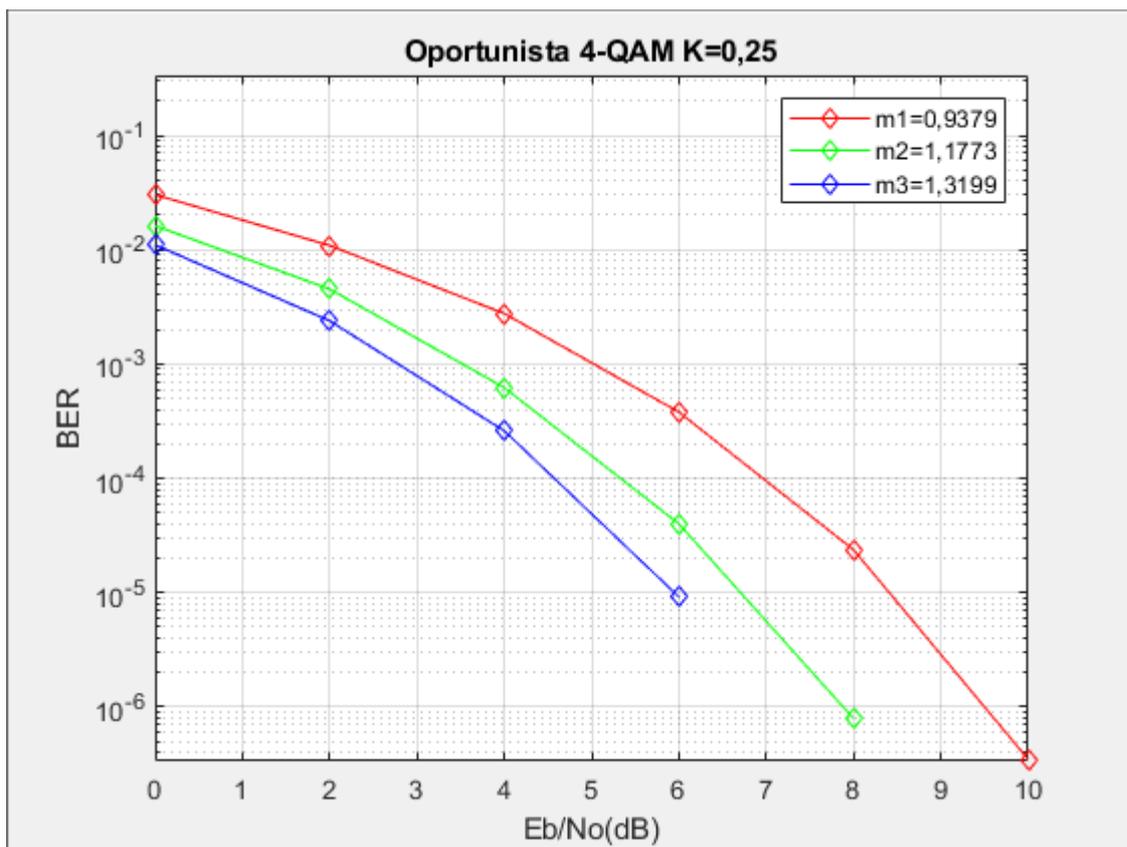


Figura 17. BER en función de  $E_b/N_o$  para un sistema oportunista que usa modulación 4-QAM con umbrales  $m_1 = 0,9379$ ,  $m_2 = 1,1773$  y  $m_3 = 1,3199$  en un canal Rice y factor  $K=0,25$ .

### 3.2 Análisis de la BER con modulaciones NS-QAM

En esta sección se evalúa la BER del sistema oportunista considerando modulaciones NS-QAM.

La Figura 18 muestra la simulación de un sistema oportunista con las modulaciones NS-QAM: 8-QAM, 32-QAM y 128-QAM. La gráfica de la BER en

función de la relación  $E_b/N_o$  considera un umbral  $m = 0,8325$  y un canal con factor  $K=0$ , es decir, un canal con desvanecimiento de tipo Rayleigh. Se observa que la BER tiende a decaer de forma exponencial cuando la SNR aumenta cuando aumenta el orden de la modulación, entonces el desempeño del sistema empeora.

La eficiencia espectral depende del orden de la modulación, es decir, si el orden de la modulación aumenta, entonces la eficiencia espectral aumenta porque se transmiten más bits por símbolo en el mismo ancho de banda. No obstante, la decodificación de los símbolos será más compleja y generará más errores es su decodificación en bits.

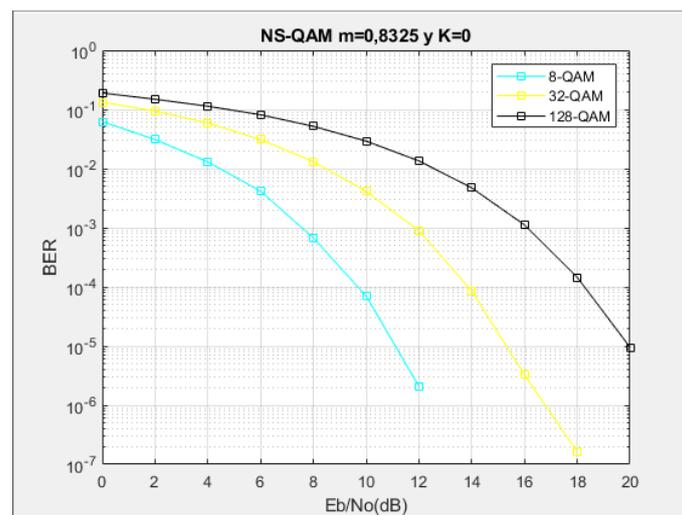


Figura 18. BER en función de  $E_b/N_o$  para un sistema oportunista que usa diferentes modulaciones NS-QAM y umbral  $m = 0,8325$  en un canal Rice y factor  $K=0$ .

En la Figura 19 se observa la BER en función de  $E_b/N_o$  considerando modulaciones NS-QAM y un umbral  $m = 0,9379$ . El canal Rice considera un factor  $K=0,25$  y de la misma forma que en las modulaciones S-QAM se puede observar que conforme el valor del umbral es mayor y el factor  $K$  es mayor el desempeño del sistema es mejor.

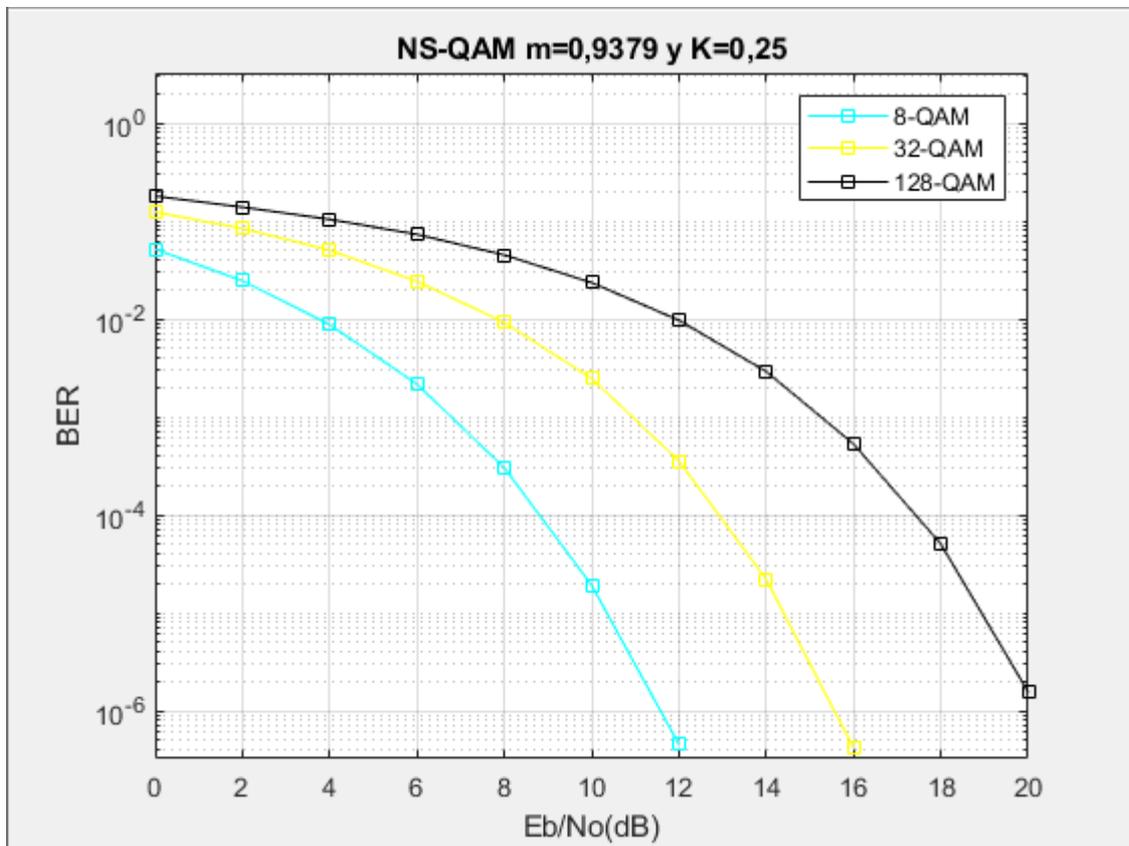


Figura 19. BER en función de  $E_b/N_0$  para un sistema oportunista que usa diferentes modulaciones NS-QAM y umbral  $m = 0,9379$  en un canal Rice y factor  $K=0,25$ .

En la Figura 20 se observa la BER en función de  $E_b/N_0$  parametrizada por distintas modulaciones NS-QAM considerando un umbral  $m = 1,2437$  en un canal Rice con factor  $K=1$ . Comprobando esta figura con la anteriores se comprueba que mientras el valor del umbral aumenta el desempeño del sistema mejora. Es importante recordar que mientras el orden de la modulación aumenta, se mejora la eficiencia espectral.

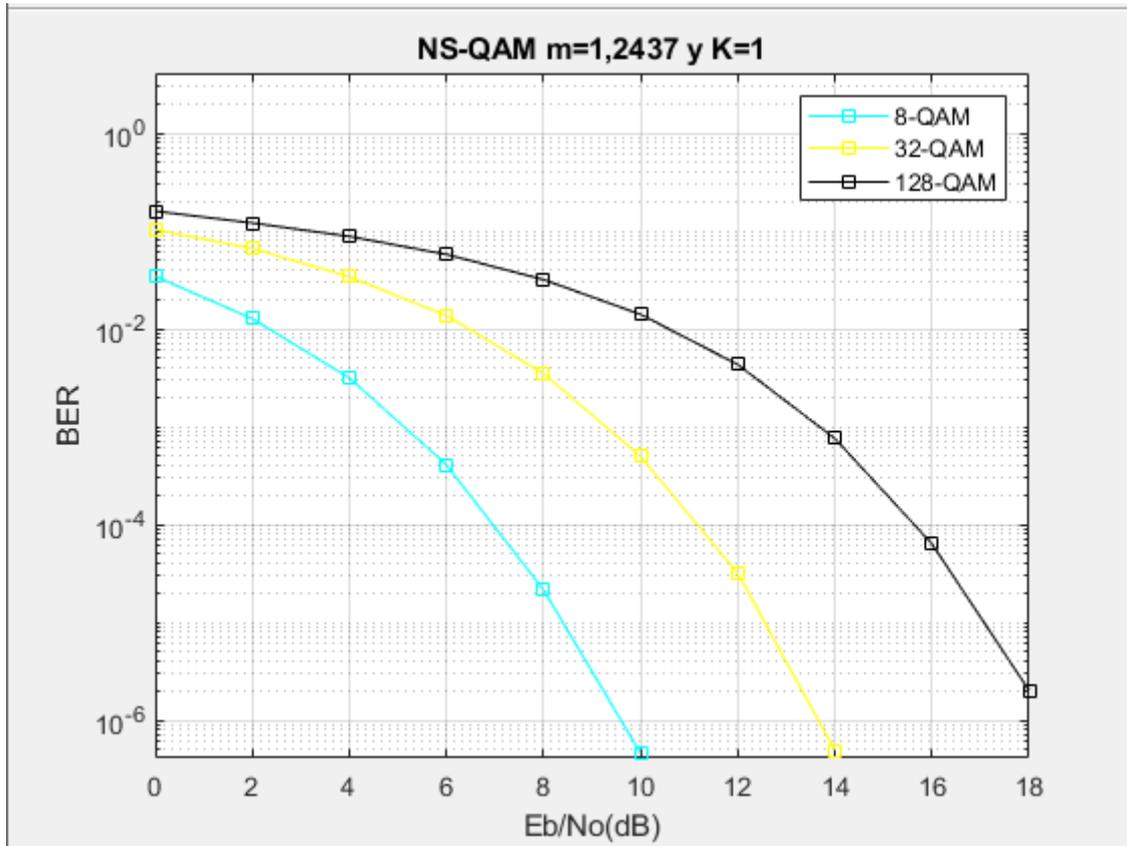


Figura 20. BER en función de  $E_b/N_o$  para un sistema oportunista que usa diferentes modulaciones NS-QAM y umbral  $m = 1,2437$  en un canal Rice y factor  $K=1$ .

En la Figura 21 se muestra la BER en función de  $E_b/N_o$  para un sistema oportunista que usa el esquema de modulación 8-QAM con tres umbrales distintos de transmisión de transmisión  $m_1 = 0,9379$ ,  $m_2 = 1,1773$  y  $m_3 = 1,3199$  considerando un canal Rice con factor  $K=0,25$ , donde se puede observar que mientras el valor umbral aumenta consecuentemente el desempeño del sistema mejora, por ejemplo con el primer umbral de transmisión la BER es de  $0,0003015$  en un  $E_b/N_o$  de 8 dB, mientras que en el segundo umbral de transmisión la BER es de  $2,957 \times 10^{-5}$  en un  $E_b/N_o$  de 8 dB y en el último umbral la BER es de  $9,475 \times 10^{-6}$  en un  $E_b/N_o$  de 8 dB, por tanto, como con un umbral mayor se obtiene menos valores de BER el desempeño del sistema es mejor.

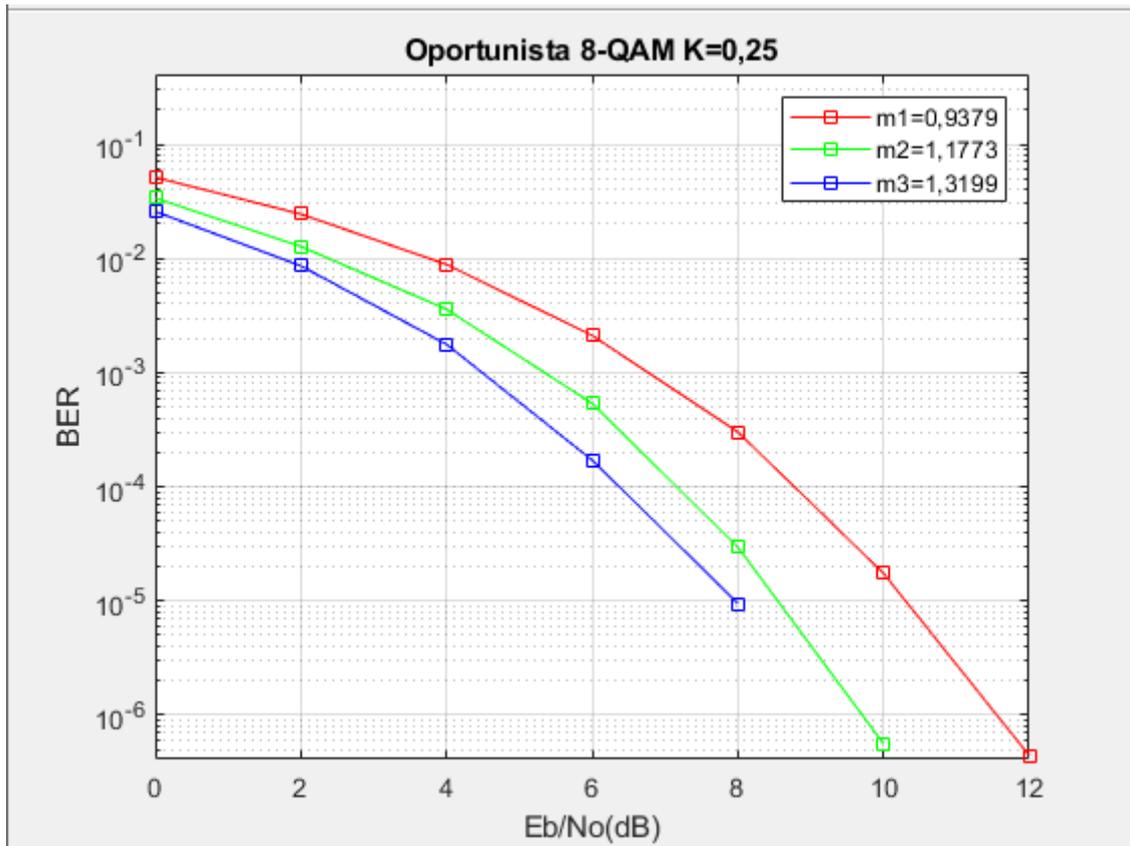


Figura 21. BER en función de  $E_b/N_o$  para un sistema oportunista que usa modulación 8-QAM con umbrales  $m_1 = 0,9379$ ,  $m_2 = 1,1773$  y  $m_3 = 1,3199$  en un canal Rice y factor  $K=0,25$ .

### 3.3 Análisis de la BER en sistemas de transmisión oportunistas con modulaciones S-QAM y NS-QAM

A continuación, se analiza el desempeño del sistema oportunista usando una comparación entre las modulaciones S-QAM y NS-QAM.

La Figura 22 muestra las curvas de la BER en función de la relación señal a ruido considerando esquemas de modulación S-QAM y NS-QAM respectivamente. En ambos casos se considera un umbral  $m = 1,2437$  y un canal Rice con factor  $K=1$  para una comparación más justa.

En la Figura se observa que cuando empleando diferentes esquemas de modulación la eficiencia espectral es más eficiente si el orden de la modulación es mayor, sin embargo, el desempeño se puede ver afectado es así por ejemplo

que para una modulación S-QAM de orden 4 la BER es de  $2,774 \times 10^{-5}$  en un valor de  $E_b/N_o$  de 6dB y para una modulación NS-QAM de orden 128 la BER es de 0,05785 en un valor de  $E_b/N_o$  de 6dB, comprobando que el orden de la modulación menor genera un mayor desempeño del sistema.

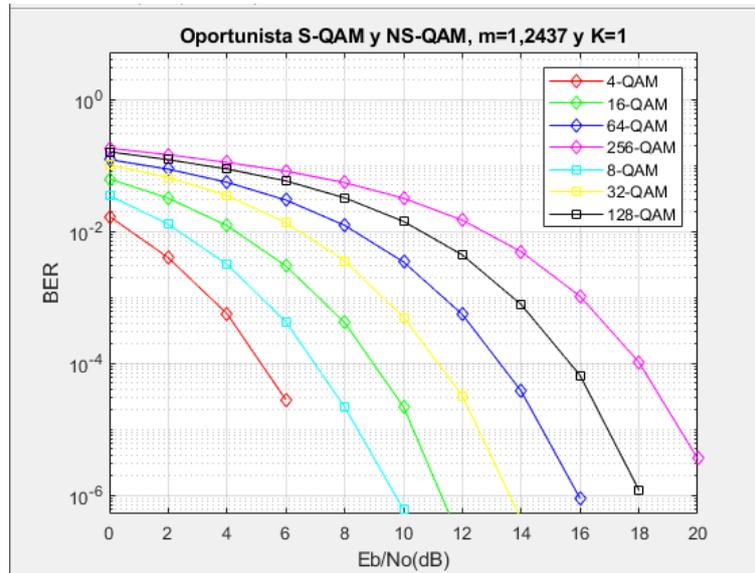


Figura 22. BER en función de  $E_b/N_o$  para un sistema oportunista que usa modulaciones S-QAM y NS-QAM considerando un umbral  $m = 1,2437$  en un canal Rice y factor  $K=1$ .

### 3.4 Comparación de sistemas con transmisión oportunista y sistemas con transmisión ordinaria

En esta sección se compara el desempeño de un sistema de transmisión ordinaria y un sistema de transmisión oportunista.

Para realizar dicha comparación se trabajará graficando la BER en función de  $E_b/N_o$  para un sistema de transmisión ordinaria y para un sistema de transmisión oportunista considerando un umbral  $m = 0,9379$  en un canal de tipo Rice con un factor  $K=0,25$ , que utiliza modulaciones S-QAM y NS-QAM, se analizará cada esquema de modulación con el mismo umbral y canal de tipo Rice de manera que la comparación sea lo más justa posible, con los resultados obtenidos se tendrá el panorama claro de las diferencias que existen entre los sistemas y modulaciones comparadas.

### 3.4.1 Comparación usando modulaciones S-QAM

Las simulaciones que se presentan son para un sistema de transmisión oportunista y un sistema de transmisión ordinario.

La Figura 24 presenta la BER en función de la SNR en canal de desvanecimiento tipo Rice y en un sistema oportunista considerando un umbral  $m = 0,9379$  y un canal tipo Rice con factor  $K=0,25$ . En la figura se observa como un sistema oportunista aprovecha el desvanecimiento del canal para realizar una transmisión más eficiente, sin embargo, cuando el orden de la modulación es mayor el desempeño del sistema oportunista es menor, pese a esto, si se realiza la comparación con el sistema de transmisión ordinario el sistema oportunista sigue teniendo mejor desempeño, mitigando los efectos del desvanecimiento.

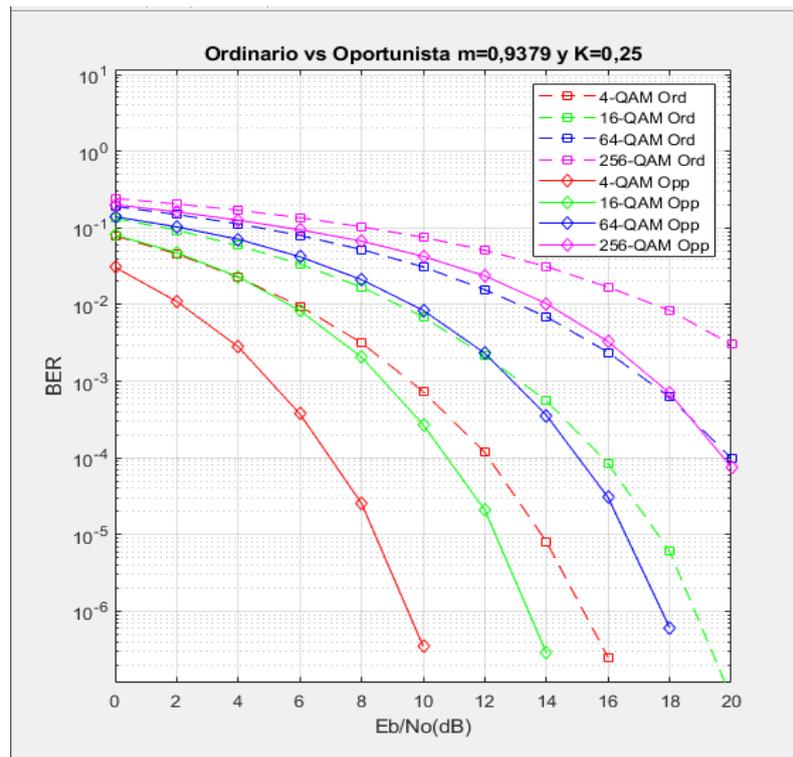


Figura 23. Comparación de la BER de un sistema ordinario y un sistema oportunista que usa modulaciones S-QAM considerando un umbral  $m = 0,9379$  en un canal tipo Rice con un factor  $K=0,25$ .

La Figura 24 presenta las curvas de la BER en función de  $E_b/N_o$  para un esquema de modulación 4-QAM considerando un umbral  $m = 1,1773$  y un canal de desvanecimiento tipo Rice con factor de  $K=0,25$ .

En la figura se puede observar que en el sistema oportunista el desempeño mejora de una manera considerable en relación con el sistema ordinario.

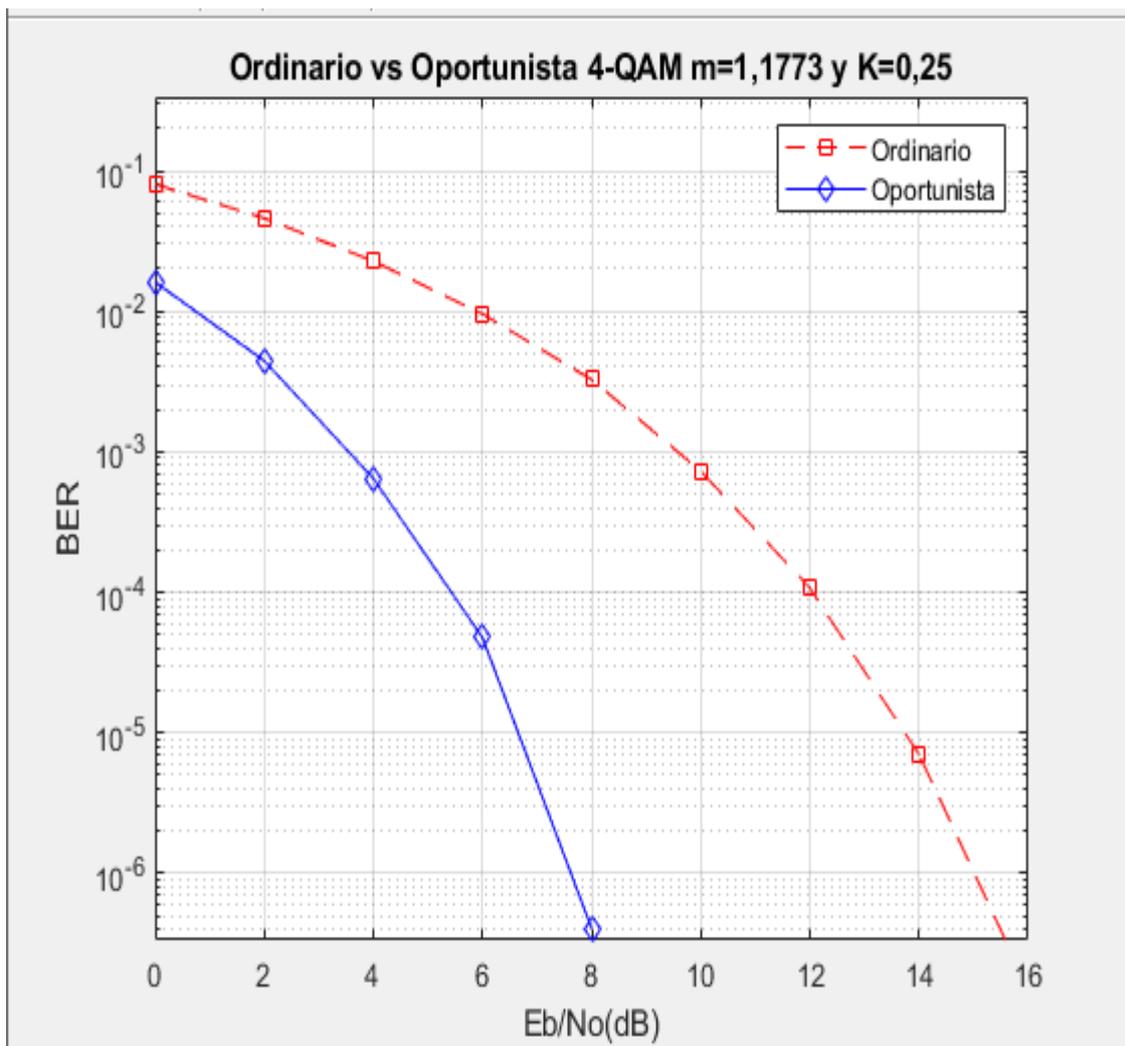


Figura 24. Comparación de la BER de un sistema ordinario y un sistema oportunista que usa modulación 4-QAM considerando un umbral  $m = 1,1773$  en un canal tipo Rice con un factor  $K=0,25$ .

En la Tabla 2 se presenta como mejora el desempeño en la BER del sistema oportunista para distintos valores de  $E_b/N_o$ .

Tabla 2

*Comparación de valores de BER obtenidos un sistema que emplea transmisión oportunista en un canal de desvanecimiento de tipo Rice con factor  $K=0,25$  y un umbral  $m = 1,1773$  en un esquema de modulación 4-QAM.*

$E_b/N_0$ (dB)	BER Transmisión Oportunista	BER Transmisión Ordinaria	Mejora en el Desempeño [%]
0	0,01612	0,07998	79,845%
2	0,004433	0,04584	90,329%
4	0,000644	0,02272	97,165%
6	$4,75 \times 10^{-5}$	0,009539	99,502%
8	$4,054 \times 10^{-7}$	0,00326	99,988%

Como se puede verificar un sistema con transmisión oportunista puede mejorar el desempeño en comparación a un sistema con transmisión ordinario empleando el mismo esquema de modulación, en un 99,988% para el escenario planteado, de esta forma se puede mejorar el desempeño del sistema.

En la Figura 25 se presenta la BER en función de  $E_b/N_0$  considerando una modulación 16-QAM en un sistema de transmisión ordinario y un sistema transmisión oportunista con un canal de desvanecimiento tipo Rice con factor  $K=0,25$  considerando un umbral  $m = 1,1773$ .

Para el esquema de modulación 16-QAM pese a que el desempeño es peor que en 4-QAM, sigue teniendo mejor desempeño en comparación con un sistema ordinario, el desempeño de este esquema llega al 99,983% en un valor de  $E_b/N_0$  de 12 dB, los resultados de las comparaciones en los valores del  $E_b/N_0$  son indicados en la Tabla 3.

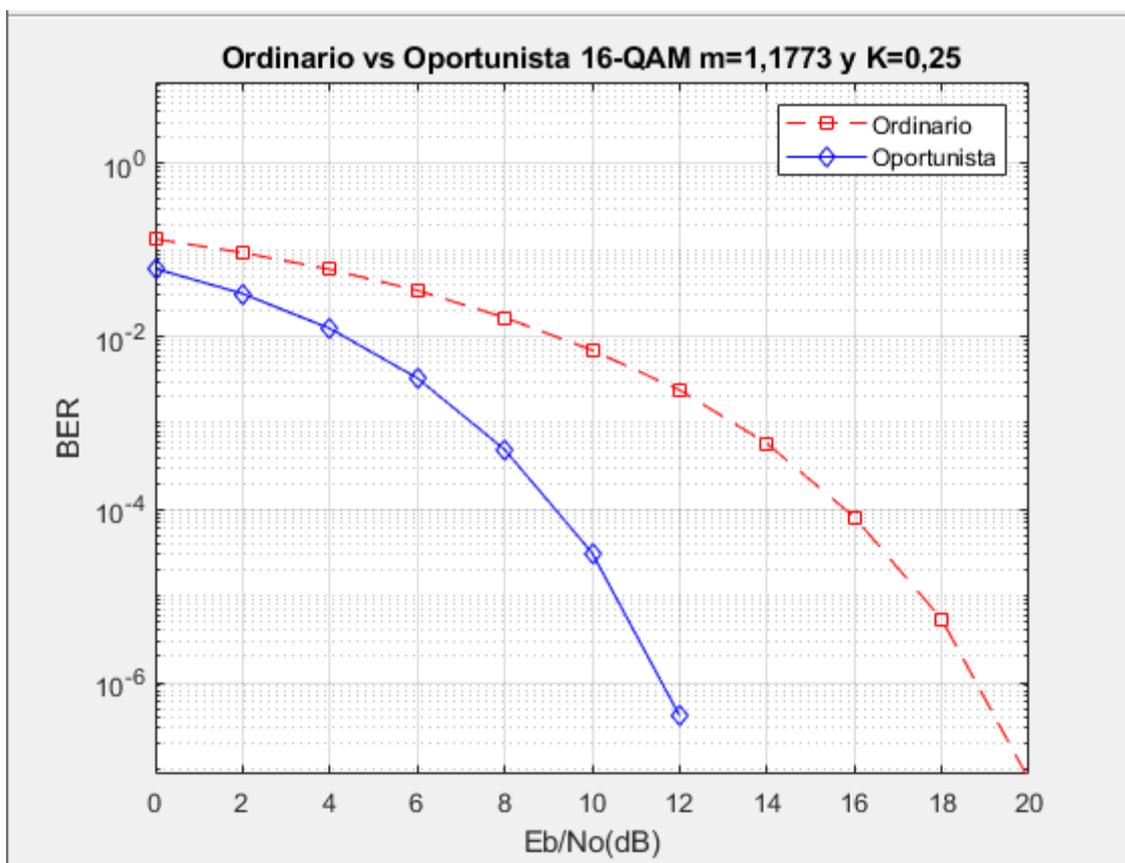


Figura 25. Comparación de la BER de un sistema ordinario y un sistema oportunista que usa modulación 16-QAM considerando un umbral  $m = 1,1773$  en un canal tipo Rice con un factor  $K=0,25$ .

Tabla 3

Comparación de valores de BER obtenidos un sistema que emplea transmisión oportunista en un canal de desvanecimiento de tipo Rice con factor  $K=0,25$  y un umbral  $m = 1,1773$  en un esquema de modulación 16-QAM.

$E_b/N_0$ (dB)	BER Transmisión Oportunista	BER Transmisión Ordinaria	Mejora en el Desempeño [%]
0	0,06075	0,1336	54,528%
2	0,03121	0,09301	66,444%
4	0,01233	0,05939	79,239%

$E_b/N_0$ (dB)	BER Transmisión Oportunista	BER Transmisión Ordinaria	Mejora en el Desempeño [%]
6	0,003298	0,03404	90,311%
8	0,0004895	0,01653	97,039%
10	$3,144 \times 10^{-5}$	0,00692	99,546%
12	$4,139 \times 10^{-7}$	0,002405	99,983%

En la Figura 26 se presenta la BER en función de  $E_b/N_0$  para un sistema oportunista que usa modulación 64-QAM considerando un umbral  $m = 1,1773$  en un canal Rice con factor  $K=0,25$ , en la figura se observa que el desempeño es mejor que el sistema de transmisión ordinario.

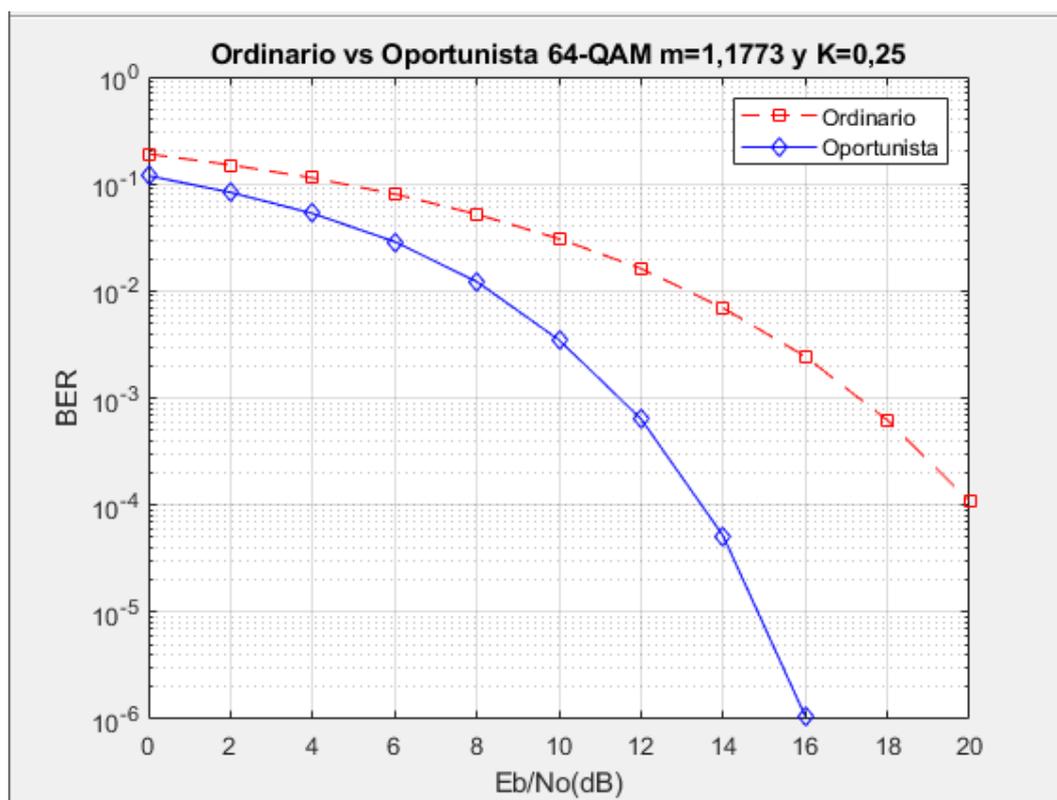


Figura 26. Comparación de la BER de un sistema ordinario y un sistema oportunista que usa modulación 64-QAM considerando un umbral  $m = 1,1773$  en un canal tipo Rice con un factor  $K=0,25$ .

La Tabla 4 muestra el porcentaje de mejora de desempeño cuando se compara el sistema de transmisión ordinario y el sistema de transmisión oportunista considerando el esquema de modulación 64-QAM.

Tabla 4

*Comparación de valores de BER obtenidos un sistema que emplea transmisión oportunista en un canal de desvanecimiento de tipo Rice con factor  $K=0,25$  y un umbral  $m = 1,1773$  en un esquema de modulación 64-QAM.*

$E_b/N_0$ (dB)	BER Transmisión Oportunista	BER Transmisión Ordinaria	Mejora en el Desempeño [%]
0	0,119	0,1904	37,500%
2	0,08343	0,1505	44,565%
4	0,053	0,1137	53,386%
6	0,02884	0,08036	64,111%
8	0,01221	0,05196	76,501%
10	0,003494	0,0308	88,656%
12	0,0006375	0,01619	96,062%
14	$5,154 \times 10^{-5}$	0,006922	99,255%
16	$1,065 \times 10^{-6}$	0,002443	99,956%

Por último, para los esquemas de modulación S-QAM, la Figura 27 muestra las curvas de la BER en función de  $E_b/N_0$  considerando un sistema oportunista que opera con un umbral  $m = 1,1773$  y modulación 256-QAM en un canal Rice con factor  $K=0,25$ . Nuevamente se verifica que el desempeño de un sistema oportunista es mejor, lo que hace que la transmisión de los datos sea más confiable.

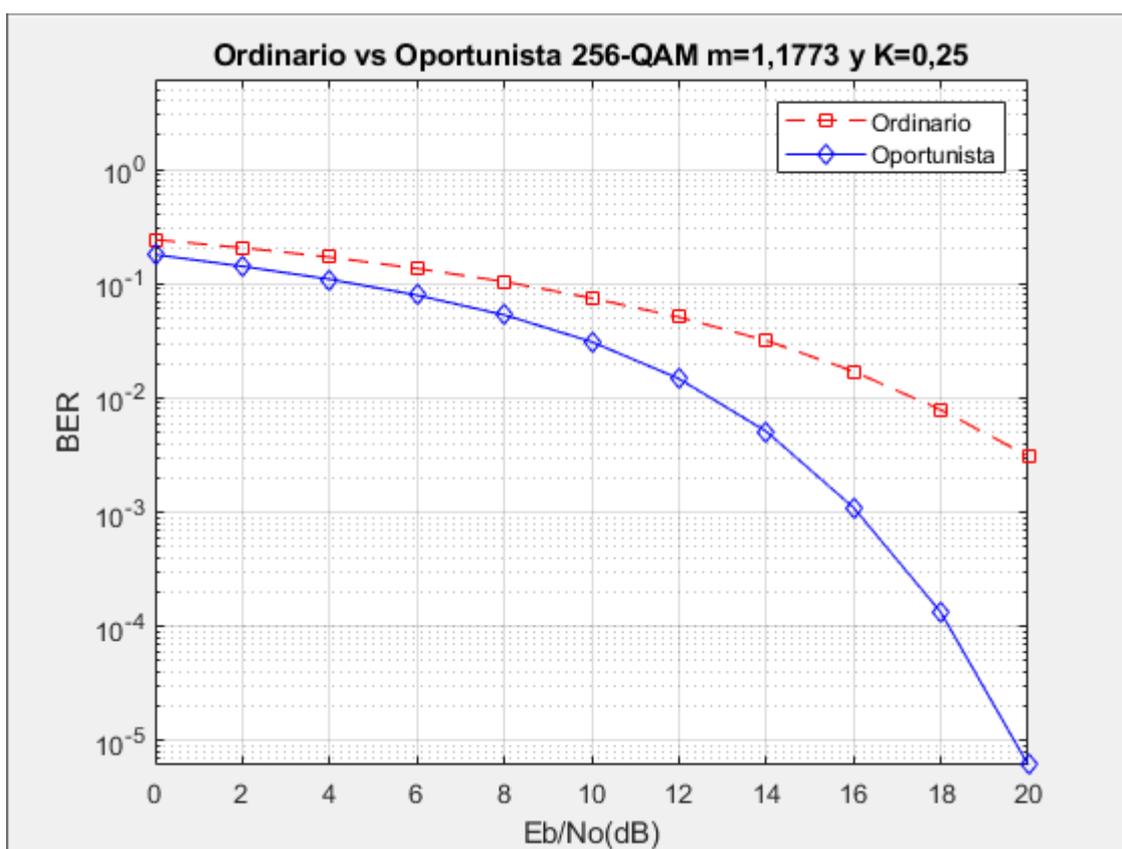


Figura 27. Comparación de la BER de un sistema ordinario y un sistema oportunista que usa modulación 256-QAM considerando un umbral  $m = 1,1773$  en un canal tipo Rice con un factor  $K=0,25$ .

La Tabla 5 muestra un análisis de la mejora de desempeño de  $E_b/N_o$  para un sistema de transmisión oportunista que usa una modulación de 256-QAM considerando un umbral  $m = 1,1773$  en un canal Rice con factor  $K=0,25$ .

Tabla 5

Comparación de valores de BER obtenidos un sistema que emplea transmisión oportunista en un canal de desvanecimiento de tipo Rice con factor  $K=0,25$  y un umbral  $m = 1,1773$  en un esquema de modulación 256-QAM.

$E_b/N_0$ (dB)	BER Transmisión Oportunista	BER Transmisión Ordinaria	Mejora en el Desempeño [%]
0	0,1791	0,242	25,992%

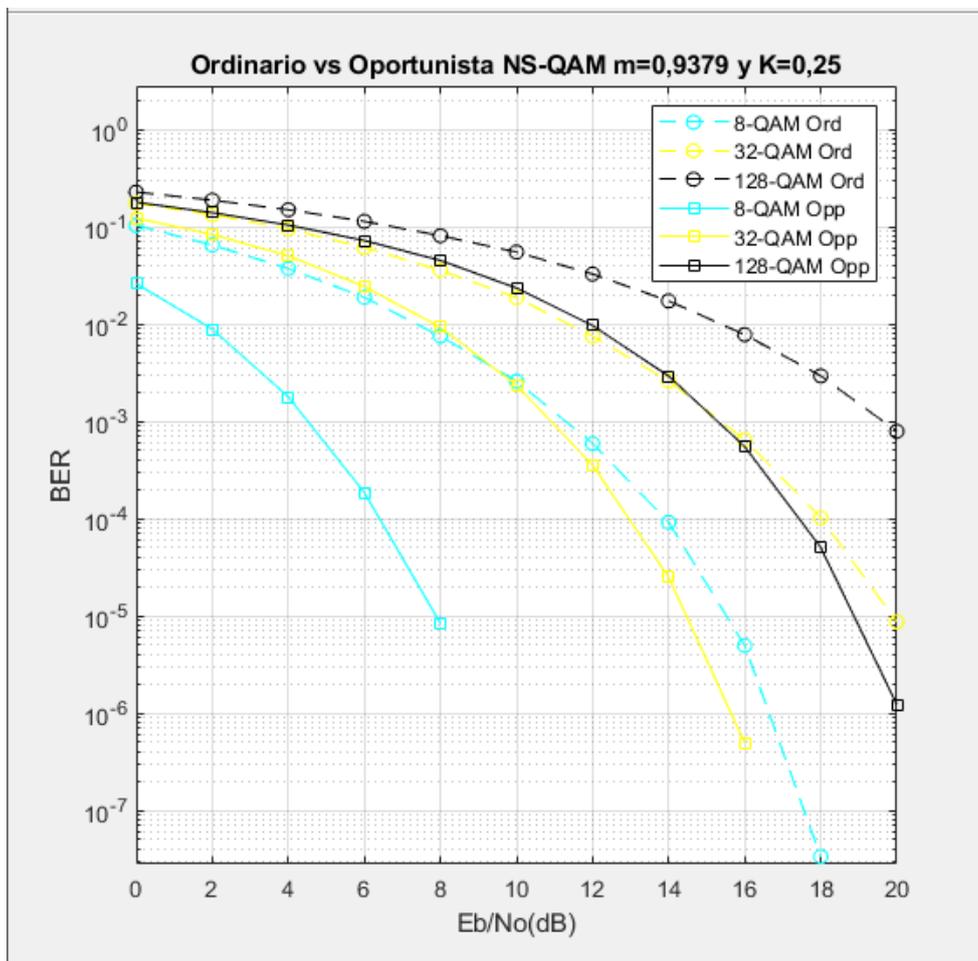
$E_b/N_0$ (dB)	BER Transmisión Oportunista	BER Transmisión Ordinaria	Mejora en el Desempeño [%]
2	0,1415	0,2056	31,177%
4	0,109	0,1702	35,958%
6	0,07914	0,1354	41,551%
8	0,05313	0,1039	48,864%
10	0,03098	0,07459	58,466%
12	0,0147	0,05085	71,091%
14	0,005088	0,03172	83,960%
16	0,001095	0,01705	93,578%
18	0,0001327	0,007847	98,309%
20	$6,144 \times 10^{-6}$	0,003102	99,802%

Una vez comparados los esquemas de modulación S-QAM, se determina que mientras el orden de la modulación sea más alto, el desempeño del sistema decae.

### 3.4.2 Comparación usando modulaciones NS-QAM

En la presente sección se analizará el desempeño del sistema de transmisión oportunista considerando esquemas de modulación NS-QAM. Específicamente se consideran modulaciones: 8-QAM, 32-QAM y 128-QAM. La Figura 28 muestra la gráfica de la BER en función de  $E_b/N_0$  de un sistema de transmisión ordinario y un sistema de transmisión oportunista que considera un canal Rice con un factor  $K=0,25$  y un umbral  $m = 0,9379$ , donde el sistema oportunista presenta un mejor desempeño que un sistema ordinario para todas las modulaciones NS-QAM.

De igual forma que en las modulaciones S-QAM, se presentarán las tablas con los valores de la BER en función de  $E_b/N_o$  para cada modulación NS-QAM, con el fin de realizar una comparación detallada y poder analizar el desempeño de cada sistema de transmisión.



*Figura 28.* Comparación la BER de un sistema ordinario y un sistema oportunista que usa modulaciones S-QAM considerando un umbral  $m = 0,9379$  en un canal tipo Rice con un factor  $K=0,25$ .

Para cada modulación, se considerará un sistema de transmisión ordinario y un sistema transmisión oportunista con umbral  $m = 1,1773$  en un canal Rice con factor de  $K=0,25$ . La Figura 29 presenta las curvas de la BER en función de  $E_b/N_o$  considerando una modulación 8-QAM. En los resultados se puede observar que con el sistema oportunista el desempeño mejora de una manera considerable en relación al sistema ordinario.

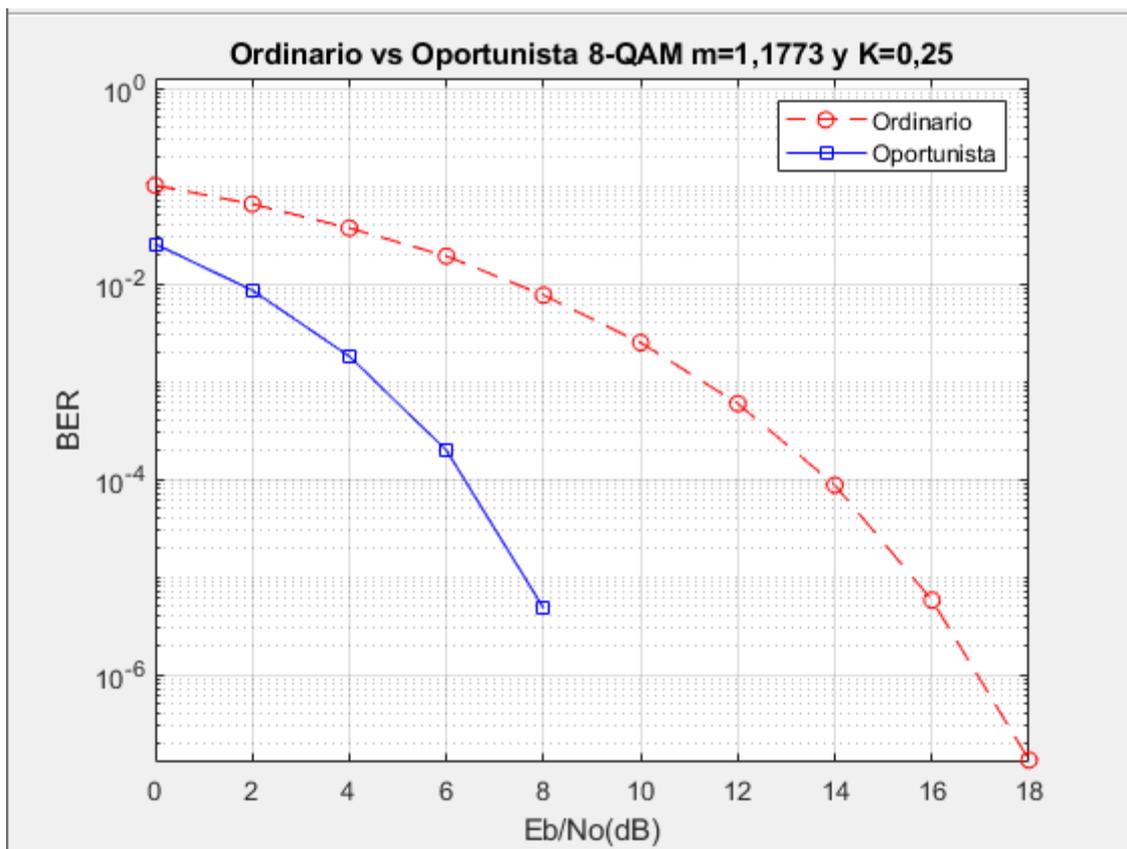


Figura 29. Comparación de la BER de un sistema ordinario y un sistema oportunista que usa modulación 8-QAM considerando un umbral  $m = 1,1773$  en un canal tipo Rice con un factor  $K=0,25$ .

La Tabla 6 muestra los datos comparativos de la BER obtenidos para cada valor de  $E_b/N_0$ . En base a estos resultados, se puede determinar que a mayor umbral es mejor el desempeño del sistema.

Tabla 6

Comparación de valores de BER obtenidos un sistema que emplea transmisión oportunista en un canal de desvanecimiento de tipo Rice con factor  $K=0,25$  y un umbral  $m = 1,1773$  en un esquema de modulación 8-QAM.

$E_b/N_0$ (dB)	BER Transmisión Oportunista	BER Transmisión Ordinaria	Mejora en el Desempeño [%]
0	0,02542	0,1012	74,881%

$E_b/N_0$ (dB)	BER Transmisión Oportunista	BER Transmisión Ordinaria	Mejora en el Desempeño [%]
2	0,008538	0,0652	86,905%
4	0,0018	0,03697	95,131%
6	0,0001966	0,01911	98,971%
8	$4,779 \times 10^{-6}$	0,007611	99,937%

En la Figura 30 se presenta las curvas de la BER en función de  $E_b/N_0$  para un sistema de transmisión ordinario y un sistema de transmisión oportunista que considera un esquema de modulación 32-QAM con un umbral de transmisión  $m = 1,177$  en un canal Rice con factor de  $K=0,25$ . Al comparar estos resultados con aquellos de la Figura 29, se verifica que conforme el orden de la modulación aumenta el desempeño disminuye. Sin embargo, sigue siendo más eficiente, en términos de la BER, que un sistema ordinario.

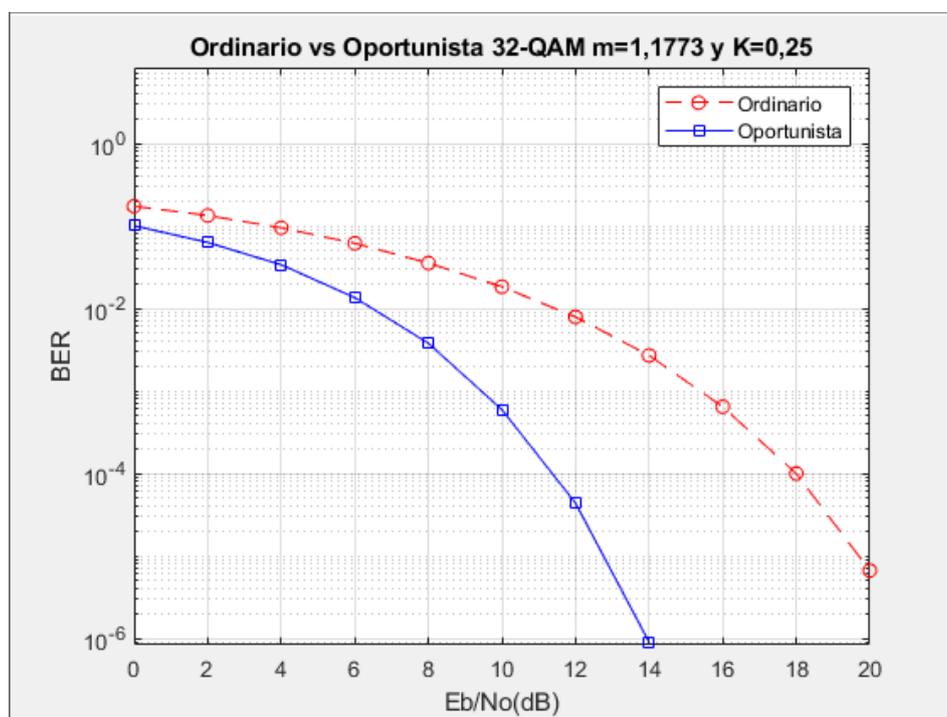


Figura 30. Comparación de la BER de un sistema ordinario y un sistema oportunista que usa modulación 32-QAM considerando un umbral  $m = 1,1773$  en un canal tipo Rice con un factor  $K=0,25$ .

En la Tabla 7 se muestran los valores de la BER para cada valor de  $E_b/N_o$ . Se puede determinar porcentualmente que un sistema con transmisión oportunista tiene mejor desempeño que un sistema con transmisión ordinaria.

Tabla 7

*Comparación de valores de BER obtenidos un sistema que emplea transmisión oportunista en un canal de desvanecimiento de tipo Rice con factor  $K=0,25$  y un umbral  $m = 1,1773$  en un esquema de modulación 32-QAM.*

$E_b/N_o$ (dB)	BER Transmisión Oportunista	BER Transmisión Ordinaria	Mejora en el Desempeño [%]
0	0,1004	0,1726	41,831%
2	0,06287	0,1335	52,906%
4	0,0337	0,09453	64,350%
6	0,01347	0,06147	78,087%
8	0,003765	0,03536	89,352%
10	0,0005901	0,01826	96,768%
12	$4,347 \times 10^{-5}$	0,007848	99,446%
14	$8,958 \times 10^{-7}$	0,00268	99,967%

Finalmente, la Figura 31 muestra la BER en función de  $E_b/N_o$  del esquema de modulación 128-QAM. En los resultados se observa que con un umbral  $m = 1,1773$  y en un canal Rice con factor de  $K=0,25$  el desempeño del sistema con transmisión oportunista es mejora logrando aumentar la eficiencia espectral.

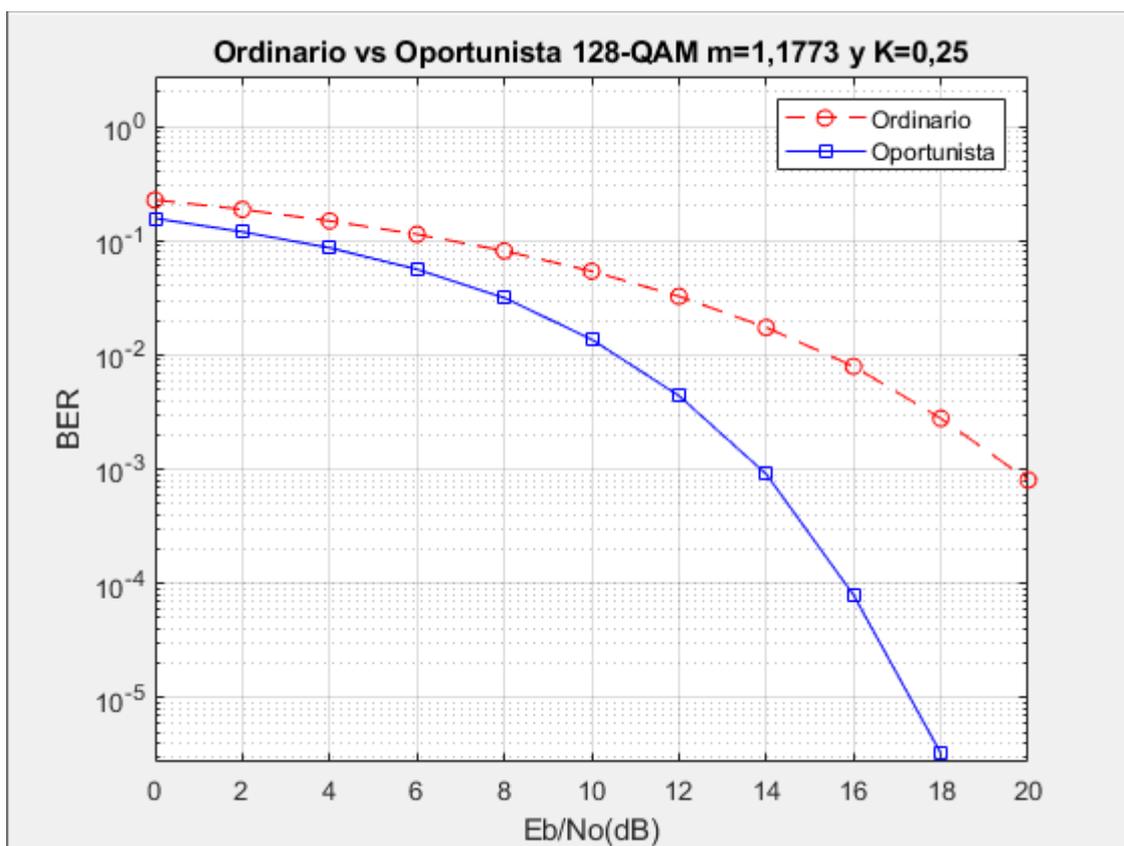


Figura 31. Comparación de la BER de un sistema ordinario y un sistema oportunista que usa modulación 128-QAM considerando un umbral  $m = 1,1773$  en un canal tipo Rice con un factor  $K=0,25$ .

La Tabla 8 muestra los valores de la BER en función de  $E_b/N_0$ , donde se comprueba que el desempeño cae progresivamente mientras el orden de la modulación es mayor.

Tabla 8

Comparación de valores de BER obtenidos un sistema que emplea transmisión oportunista en un canal de desvanecimiento de tipo Rice con factor  $K=0,25$  y un umbral  $m = 1,1773$  en un esquema de modulación 128-QAM

$E_b/N_0$ (dB)	BER Transmisión Oportunista	BER Transmisión Ordinaria	Mejora en el Desempeño [%]
0	0,1563	0,2265	30,993%

$E_b/N_0$ (dB)	BER Transmisión Oportunista	BER Transmisión Ordinaria	Mejora en el Desempeño [%]
2	0,1192	0,1871	36,291%
4	0,08636	0,1483	41,767%
6	0,05595	0,1135	50,705%
8	0,03155	0,08117	61,131%
10	0,01364	0,05392	74,703%
12	0,004386	0,0325	86,505%
14	0,0009052	0,01736	94,786%
16	$7,926 \times 10^{-5}$	0,007932	99,001%
18	$3,255 \times 10^{-6}$	0,002776	99,883%

## 4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1 Conclusiones

En el presente documento se analizó el desempeño de un sistema de transmisión oportunista considerando un canal con desvanecimiento de tipo Rice empleando modulaciones QAM cuadradas y no cuadradas. Dicho mecanismo de transmisión aprovecha las propiedades estadísticas del desvanecimiento y mediante un enlace de retroalimentación el receptor indica al transmisor que realice el envío de la información en instantes donde el desvanecimiento no es destructivo para la señal.

El análisis de desempeño se realizó en función de la BER.

La simulación del sistema se llevó a cabo en el software Matlab, que es una herramienta que permite simular distintos tipos de señales y sistemas de telecomunicaciones.

Los resultados muestran que mientras el orden de la modulación aumenta, el desempeño del sistema disminuye para un mismo valor de relación señal a ruido. Esto se debe a que mientras mayor es el orden de la modulación, existen más símbolos en la constelación, lo que implica que el receptor tiene una mayor probabilidad de cometer errores en la detección.

Al comparar la BER de un sistema oportunista y de un sistema ordinario, se verifica que la estrategia oportunista produce una mejora significativa en el rendimiento de los sistemas de transmisión inalámbricos. Con las simulaciones se observa que la probabilidad de error de bit disminuye en un sistema con transmisión oportunista, es decir se pueden mitigar los efectos del desvanecimiento de forma considerable.

Se determinó que un sistema con transmisión oportunista tiene menor eficiencia espectral que un sistema con transmisión ordinaria porque existen periodos de no transmisión. Sin embargo, es posible aumentar la eficiencia espectral del sistema oportunista, aumentando el orden de la modulación.

Se observó además que conforme el valor de umbral aumenta y el orden de la modulación disminuye, el desempeño del sistema con transmisión oportunista tiene una mejora considerable en relación con el sistema con transmisión ordinaria. Es así por ejemplo que, para un esquema de modulación 4-QAM, se puede reducir la BER entre un 60% al 80%, en función del umbral y la relación señal a ruido.

Existen diferentes estudios que analizan el desempeño de un sistema oportunista o que buscan mejorar el rendimiento del sistema de comunicaciones inalámbrico. Pues se ha considerado un canal con desvanecimiento de tipo Rice, lo cual no había sido hecho en la literatura. No obstante, el presente trabajo contribuye y complementa dichos estudios.

#### **4.2 Recomendaciones**

Es recomendable seguir realizando estudios similares al realizado en este documento. Así se recomienda extender los análisis a otros tipos de desvanecimiento, como por ejemplo Nakagami que se suele utilizar comúnmente para transmisiones de radio urbana y digital (Orozco & de Almeida, 2013).

Sería una propuesta interesante considerar técnicas de transmisión oportunista con diferentes técnicas de acceso múltiple, como por ejemplo OFDM.

Se recomienda realizar un análisis con el fin de mejorar aún más el rendimiento del sistema, combinando el sistema oportunista con técnicas de diversidad como diversidad de frecuencia.

Finalmente, se recomienda investigar y simular diferentes escenarios de transmisiones oportunistas con desvanecimiento tipo Rice, incluyendo escenarios adicionales como interferencia de co-canal y arreglos de antenas.

## REFERENCIAS

- Rábanos, J. M.H., Tomás, L. M., & Salís, J. M.R. (2015). *Comunicaciones móviles (3ª ed.)*. Madrid, España: Editorial Universitaria Ramón Areces.
- Orozco, N. (2014). *Análise de Desempenho de uma Proposta de Transmissão Oportunista sem fio em Canais com Desvanecimento Rayleigh e na Presença de Interferência de Co-Canal para Diferentes Esquemas de Modulação*. Campinas.
- Carvajal, H. (2018). *Avaliação da Probabilidade de Erro de Bit e da Eficiência Espectral de Sistemas Celulares MC-CDMA que Utilizam Detecção Multiusuário*. Campinas.
- Hua Fu, & Pooi-Yuen Kam, (2011). Exponential-Type Bounds on the First-Order Marcum Q-Function. *2011 IEEE Global Telecommunications Conference - GLOBECOM 2011*, . <https://doi.org/10.1109/glocom.2011.6133801>
- Papoulis, A., & Pillai, S. U. (2002). *Probability, Random Variables, and Stochastic Processes*. New York, United States: McGraw-Hill.
- Varughese, S., Thomas, V. A., Isautier, P., Langston, J., Alfiad, M., Tibuleac, S., & Ralph, S. E. (2016). *ENoB requirements for non-square 64-QAM*. *2016 IEEE Photonics Conference (IPC)*, . <https://doi.org/10.1109/ipcon.2016.7830969>
- Hanzó, L. (2004). *Quadrature amplitude modulation: from basics to adaptive trellis-coded, turbo-equalised and space-time coded OFDM, CDMA and MC-CDMA systems (2ª ed.)*. Chichester, England: IEEE Press
- Tomasi, W., Hernández, G. M., & Pozo, V. G. (2003). *Sistemas de comunicaciones electrónicas (4ª ed.)*. Arizona, México: Pearson Educación.
- Krouk, E., & Semenov, S. (2011). *Modulation and Coding Techniques in Wireless Communications (4ª ed.)*. Chichester, England: Wiley.
- Ha, T. T. (2011). *Theory and Design of Digital Communication Systems (4ª ed.)*. New York, United States: Cambridge University Press.
- Core, M., Campbell, R., Quan, P., & Wada, J. (2009). *Semianalytic BER for PSK*. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 8(4), 1644–1648. <https://doi.org/10.1109/twc.2009.071412>

- Wongtrairat, W., & Supnithi, P. (2011). New simple form for PDF and MGF of Rician fading distribution. *2011 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communications Systems (ISPACS)*, <https://doi.org/10.1109/ispacs.2011.6146087>
- Ali, A. A., & Alkhudairi, K. (2006). BER for M-QAM with Space Diversity and MRC in Rician Fading Channels. *2006 Proceedings of the First Mobile Computing and Wireless Communication International Conference*, <https://doi.org/10.1109/mcwc.2006.4375198>
- Kumar, S., Gupta, P. K., Singh, G., & Chauhan, D. S. (2013). Performance Analysis of Rayleigh and Rician Fading Channel Models using Matlab Simulation. *International Journal of Intelligent Systems and Applications*, 5(9), 94–102. <https://doi.org/10.5815/ijisa.2013.09.11>
- Jung, B. C., Park, D., & Shin, W. (2012). Opportunistic Interference Mitigation Achieves Optimal Degrees-of-Freedom in Wireless Multi-Cell Uplink Networks. *IEEE Transactions on Communications*, 60(7), 1935–1944. <https://doi.org/10.1109/tcomm.2012.051012.110205>
- Kikuchi, N., & Sasaki, S. (2010). Highly Sensitive Optical Multilevel Transmission of Arbitrary Quadrature-Amplitude Modulation (QAM) Signals With Direct Detection. *Journal of Lightwave Technology*, 28(1), 123–130. <https://doi.org/10.1109/jlt.2009.2035827>
- Nathaly Orozco, G., & De Almeida, C. (2013). Performance evaluation of opportunistic wireless transmission in Rayleigh fading channels with co-channel interference. *2013 IEEE Latin-America Conference on Communications*, <https://doi.org/10.1109/latincom.2013.6759826>
- Khairy, M., & Geraniotis, E. (2000). BER evaluation of symbol-aided coherent demodulation for Rician and Rayleigh fading channels. *Proceedings Third IEEE Symposium on Computers and Communications. ISCC'98*. (Cat. No.98EX166), <https://doi.org/10.1109/iscc.1998.702467>
- Xiaodai Dong, Tjeng Thiang Tjhung, & Adachi, F. (1998). Error probability analysis for 16 STAR-QAM in frequency-selective Rician fading with diversity reception. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 47(3), 924–935. <https://doi.org/10.1109/25.704846>

- Bocus, M. Z., Dettmann, C. P., & Coon, J. P. (2013). An Approximation of the First Order Marcum Q-Function with Application to Network Connectivity Analysis. *IEEE Communications Letters*, 17(3), 499–502. <https://doi.org/10.1109/lcomm.2013.011513.122462>
- Lindsey, W. (1964). Error probabilities for Rician fading multichannel reception of binary signals. *IEEE Transactions on Information Theory*, 10(4), 339–350. <https://doi.org/10.1109/tit.1964.1053703>
- Ahlem, B. L., Bechir Dadi, M., & Belgacem Rhaimi, C. (2015). Evaluation of BER of digital modulation schemes for AWGN and wireless fading channels. 2015 *World Congress on Information Technology and Computer Applications (WCITCA)*, . <https://doi.org/10.1109/wcitca.2015.7367027>
- Jonqyin Sun (2014). Linear diversity analysis for QAM in Rician fading channels. 2014 *23rd Wireless and Optical Communication Conference (WOCC)*, . <https://doi.org/10.1109/wocc.2014.6839960>
- MathWorks. (s.f.-b). Demodulate QAM Fixed-Point Signal. Recuperado 11 octubre, 2019, de <https://la.mathworks.com/help/comm/ref/qammod.html>
- MathWorks. (s.f.). Normally distributed random numbers. Recuperado 12 octubre, 2019, de <https://la.mathworks.com/help/matlab/ref/randn.html>

## **ANEXOS**

## ANEXO 1

Este programa principal permite simular las gráficas de la BER en función del  $E_b/N_o$  para distintos esquemas de modulación QAM.

```
%%%%%%%%%%%%Creación de la función principal%%%%%%%%%%%%
function [ BER, outSignal] = Ordinario_Rician( varargin )
    %%%%%%%%%%%%%Valores requeridos por defecto%%%%%%%%%%%%
    opp = true;
    EbNoDBVec = -10:2:10;
    nIter = 1e2;
    dataSize = 1e3;
    error = Inf;
    showBar = true;
    fadding = true;
    %%%%%%%%%%%%%Solicitud de parámetros de ingreso%%%%%%%%%%%%
    [M,opp,EbNoDBVec,nIter,dataSize,error,showBar,fadding] = validarEntradas(...
    M,opp,EbNoDBVec,nIter,dataSize,error,showBar,fadding,varargin{:});
    %%%%%%%%%%%%%Generación de la matriz de datos%%%%%%%%%%%%
    nEbNo = length( EbNoDBVec(:) );
    if length(error) ~= nEbNo
        error = repmat( error(1), nEbNo, 1 );
    end
    BER = zeros( nEbNo, length(opp) );
    if nEbNo == 1, showBar = false; end
    if showBar, bar = updateBar( [], 0 ); end
    %%%%%%%%%%%%%Valores de umbral%%%%%%%%%%%%
    %umbral = 0.8325;
    %umbral = 1.0481;
    %umbral = 1.1774;
    %umbral = 1.2686;
    %umbral = 0.9379;
    %umbral = 1.1773;
    %umbral = 1.3199;
    %umbral = 1.4202;
    %umbral = 1.2437;
    %umbral = 1.5193;
    %umbral = 1.6787;
    %umbral = 1.7890;
    %%%%%%%%%%%%%Gaussianas para utilización en canal de desvanecimiento tipo
    Rice%%%%%%%%%%%%
    K = 1; %%factor K rician fading
    s = sqrt(K/(K+1));% cuadratura
    Sigma= 1/sqrt(2*(K+1));
    %%%%%%%%%%%%%Parámetros establecidos%%%%%%%%%%%%
```

```

outSignal = zeros( dataSize*nIter, nEbNo );%%calculo del BER
for j = 1:nEbNo
auxSignal = nan( dataSize, nIter );
%Parámetros calculados
EbNo = 10 ^ ( EbNoDBVec(j) / 10 );
EsNo = log2(M) * EbNo;
Sigma_n = sqrt( 1 / 2 / EsNo );
e_media = sqrt( 2*(M-1)/3 );
errCont = 0; nSym = 0;
for i = 1:nIter
        %%%%%%%%%Retroalimentación%%%%%%%%
if fading
        %%%%%%%%%Canal Rice%%%%%%%%
fading = (Sigma*randn(1,1)+s) + 1i*(Sigma*randn(1,1));
else
fading = 1;
end
        %%%%%%%%%Verificación del umbral%%%%%%%%
if fading >= umbral || ~opp
        %%%%%%%%%Creación del transmisor%%%%%%%%
dataIn = randi( [0 M-1], dataSize, 1 );
txSignal = qammod( dataIn, M ) / e_media;%%modulaciones
        %%%%%%%%%Canal con ruido%%%%%%%%
noise = Sigma_n * randn(dataSize,2) * [ 1; 1i ];
        %%%%%%%%%Canal con desvanecimiento y ruido%%%%%%%%
noiseSignal = fading*txSignal + noise;
        %%%%%%%%%Creación del receptor%%%%%%%%
rxSignal = e_media * noiseSignal / fading;
auxSignal(:,i) = rxSignal;
dataOut = qamdemod( rxSignal, M );%%modulaciones
        %%%%%%%%%Conteo de errores %%%%%%%%%
errCont = errCont + biterr( dataIn, dataOut );
nSym = nSym + 1;
end
outSignal( :, j ) = reshape( auxSignal, [], 1 );
BER(j) = errCont / nSym / log2(M) / dataSize;
end
if nargin == 0 && length(EbNoDBVec) > 1
semilogy( EbNoDBVec, BER, '-s' )
grid on
xlabel('EbNo')
ylabel('BER')
title(sprintf('%u-QAM',M))
end
try

```

```

close(bar)
catch
end
end
end
%%%%%%Funcion para permitir parámetros de ingreso%%%%%%%%
function [M,opp,EbNoDBVec,nlter,dataSize,error,showBar,fadding] =
validarEntradas(...
M,opp,EbNoDBVec,nlter,dataSize,error,showBar,fadding,varargin)
p = inputParser;
addOptional( p, 'M', M, @(x) 2^round(log2(x)) == x );
addOptional( p, 'opp', opp, @(x) islogical(x) );
addOptional( p, 'EbNoDBVec', EbNoDBVec, @(x) ~isempty(x) );
addParameter( p, 'nlter', nlter, @(x) x > 0 && round(x) == x );
addParameter( p, 'dataSize', dataSize, @(x) x > 0 && round(x) == x );
addParameter( p, 'error', error, @(x) x > 0 );
addParameter( p, 'showBar', showBar, @(x) islogical(x) );
addParameter( p, 'fadding', fadding, @(x) islogical(x) );
parse( p, varargin{:} );
M = p.Results.M;
opp = p.Results.opp;
EbNoDBVec = p.Results.EbNoDBVec;
nlter = p.Results.nlter;
dataSize = p.Results.dataSize;
error = p.Results.error;
showBar = p.Results.showBar;
fadding = p.Results.fadding;
if fadding == false
opp = false;
end
end

```

## ANEXO 2

Mediante este programa permite invocar al programa principal y mostrar las gráficas de la BER en función del  $E_b/N_o$ .

```

clear; clc; cla;
%%%%%%%%Parámetros de ingreso%%%%%%%%
EbNoDBVec = 0:2:20;
nlter = 1e4;%%numero de errores
nShow = 1e3;
%%%%%%%%Invocación del programa principal%%%%%%%%
%%%%%%%%Modulación 4-QAM Sistema ordinario %%%%%%%%%
[ BER4F, OUT4F ] = Ordinario_Rician( 4, false, EbNoDBVec, 'fadding', true,
'nlter', nlter );

```

```

semilogy( EbNoDBVec, BER4F, '-rd' )
hold on%%%%%%%%Mantener gráfica
%%%%%%%%%%Modulación 4-QAM Sistema oportunista %%%%%%%%%%%
[ BER4O, OUT4O ] = Ordinario_Rician( 4, true, EbNoDBVec, 'fading', true,
'nlter', nlter );
semilogy( EbNoDBVec, BER4O, 'ro--' )
hold on%%%%%%%%Mantener gráfica
%%%%%%%%%%Modulación 16-QAM Sistema ordinario %%%%%%%%%%%
[ BER16F, OUT16F ] = Ordinario_Rician( 16, false, EbNoDBVec, 'fading', true,
'nlter', nlter );
semilogy( EbNoDBVec, BER16F, '-bd' )
hold on%%%%%%%%Mantener gráfica
%%%%%%%%%%Modulación 16-QAM Sistema oportunista %%%%%%%%%%%
[ BER16O, OUT16O ] = Ordinario_Rician( 16, true, EbNoDBVec, 'fading', true,
'nlter', nlter );
semilogy( EbNoDBVec, BER16O, 'bo--' )
hold on%%%%%%%%Mantener gráfica
%%%%%%%%%%Modulación 64-QAM Sistema ordinario %%%%%%%%%%%
[ BER64F, OUT64F ] = Ordinario_Rician( 64, false, EbNoDBVec, 'fading', true,
'nlter', nlter );
semilogy( EbNoDBVec, BER64F, '-gd' )
hold on%%%%%%%%Mantener gráfica
%%%%%%%%%%Modulación 64-QAM Sistema oportunista %%%%%%%%%%%
[ BER64O, OUT64O ] = Ordinario_Rician( 64, true, EbNoDBVec, 'fading', true,
'nlter', nlter );
semilogy( EbNoDBVec, BER64O, 'go--' )
hold on%%%%%%%%Mantener gráfica
%%%%%%%%%%Modulación 256-QAM Sistema ordinario %%%%%%%%%%%
[ BER256F, OUT256F ] = Ordinario_Rician( 256, false, EbNoDBVec, 'fading',
true, 'nlter', nlter );
semilogy( EbNoDBVec, BER256F, '-kd' )
hold on%%%%%%%%Mantener gráfica
%%%%%%%%%%Modulación 256-QAM Sistema oportunista %%%%%%%%%%%
[ BER256O, OUT256O ] = Ordinario_Rician( 256, true, EbNoDBVec, 'fading',
true, 'nlter', nlter );
semilogy( EbNoDBVec, BER256O, 'ko--' )
hold on%%%%%%%%Mantener gráfica
grid on%%%%%%%%Dibujar grilla ó líneas de cuadrícula
xlabel('Eb/No(dB)')
ylabel('BER')
title('Oportunista y Ordinario')
legend( 'Ord 4-QAM', 'Opp 4-QAM', 'Ord 16-QAM', 'Opp 16-QAM', 'Ord 64-
QAM', 'Opp 64-QAM', 'Ord 256-QAM', 'Opp 256-QAM')
%%%%%%%%%%Modulación 8-QAM Sistema ordinario %%%%%%%%%%%

```

```

[ BER8F, OUT8F ] = Ordinario_Rician( 8, false, EbNoDBVec, 'fadding', true,
'nlter', nlter );
semilogy( EbNoDBVec, BER8F, '-ro' )
hold on%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Mantener gráfica
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Modulación 8-QAM Sistema oportunista %%%%%%%%%%
[ BER8O, OUT8O ] = Ordinario_Rician( 8, true, EbNoDBVec, 'fadding', true,
'nlter', nlter );
semilogy( EbNoDBVec, BER8O, 'rs--' )
hold on%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Mantener gráfica
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Modulación 32-QAM Sistema ordinario %%%%%%%%%%
[ BER32F, OUT32F ] = Ordinario_Rician( 32, false, EbNoDBVec, 'fadding', true,
'nlter', nlter );
semilogy( EbNoDBVec, BER32F, '-bo' )
hold on%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Mantener gráfica
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Modulación 32-QAM Sistema oportunista %%%%%%%%%%
[ BER32O, OUT32O ] = Ordinario_Rician( 32, true, EbNoDBVec, 'fadding', true,
'nlter', nlter );
semilogy( EbNoDBVec, BER32O, 'bs--' )
hold on%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Mantener gráfica
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Modulación 128-QAM Sistema ordinario %%%%%%%%%%
[ BER128F, OUT128F ] = Ordinario_Rician( 128, false, EbNoDBVec, 'fadding',
true, 'nlter', nlter );
semilogy( EbNoDBVec, BER128F, '-go' )
hold on%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Mantener gráfica
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Modulación 128-QAM Sistema oportunista %%%%%%%%%%
[ BER128O, OUT128O ] = Ordinario_Rician( 128, true, EbNoDBVec, 'fadding',
true, 'nlter', nlter );
semilogy( EbNoDBVec, BER128O, 'gs--' )
hold on%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Mantener gráfica
grid on%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Dibujar grilla ó líneas de cuadrícula
xlabel('Eb/No(dB)')
ylabel('BER')
title('Oportunista y Ordinario')
legend( 'Ord 8-QAM', 'Opp 8-QAM', 'Ord 32-QAM', 'Opp 32-QAM', 'Ord 128-
QAM', 'Opp 128-QAM')

```

