



FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS APLICADAS

ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE UN SISTEMA INALÁMBRICO QUE
EMPLEA TRANSMISIÓN OPORTUNISTA Y MODULACIONES QAM NO
CUADRADAS.

AUTOR

FRANCISCO ROBERTO TOAPANTA HIDALGO

AÑO

2019



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE UN SISTEMA INALÁMBRICO QUE EMPLEA
TRANSMISIÓN OPORTUNISTA Y MODULACIONES QAM NO CUADRADAS

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

Profesor Guía

PhD. Orozco Garzón Nathaly Verónica

Autor

Francisco Roberto Toapanta Hidalgo

Año

2019

DECLARACIÓN PROFESOR GUÍA

"Declaro haber dirigido el trabajo, análisis del desempeño de un sistema inalámbrico que emplea transmisión oportunista y modulaciones QAM no cuadradas, a través de reuniones periódicas con el estudiante Francisco Roberto Toapanta Hidalgo, en el semestre 201920, 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 que emplea transmisión oportunista y modulaciones QAM no cuadradas, de Francisco Roberto Toapanta Hidalgo, en el semestre 201920, 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

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.”

Francisco Roberto Toapanta Hidalgo

CI: 1717919037

AGRADECIMIENTOS

Agradezco infinitamente a Dios y San Juan por brindarme la sabiduría para emprender este proyecto y culminarlo de manera asertiva. También, quiero agradecer a mis profesores guías, quienes cristalizaron la idea para la realización de este proyecto y motivaron el desarrollo de el mismo, a mi tutora de tesis PhD. Nathaly Orozco por su predisposición, apoyo y profesionalismo.

A mis padres Gerardo Toapanta e Ipatia Hidalgo por haberme enseñado valores como: el esfuerzo, la constancia, respeto, humildad y responsabilidad ante mis proyectos de vida. A ellos mi gratitud por haberme dado la oportunidad de superarme y estar a mi lado en todo momento.

DEDICATORIA

El presente proyecto lo dedico a mi hermoso hijo Juan Francisco quién es lo más valioso que tengo en la vida, de quien me siento orgulloso y que a partir de su nacimiento ha sido la motivación más grande para superarme constantemente y cumplir mis sueños. A mi amada esposa Gaby, quien es dueña de mis sentimientos y que me engrandece a diario, haciendo de mí un hombre digno de vivir a su lado.

También, quiero dedicar este logro a mi hermana Paola con quien llevo una relación muy afectiva de respeto, amor y le considero como mi segunda madre. Además, dedico el presente proyecto a mi familia cercana con quién vivo y a mis dos amigos; mismos que estuvieron presentes en su momento aportando al desarrollo de mis objetivos.

RESUMEN

En el presente proyecto analiza el rendimiento de un sistema inalámbrico que emplea transmisión oportunista con modulaciones no cuadradas 8-QAM y 32-QAM. Dicho análisis considera un canal con ruido blanco aditivo gaussiano y desvanecimiento plano-lento de tipo Rayleigh. Para esto, el mecanismo del sistema con transmisión oportunista establece umbrales de transmisión los cuales dependen de la probabilidad de transmisión que se requiera. El análisis del desempeño para el sistema propuesto se basa en la probabilidad de error de bit (BER). Con este parámetro se verifica la mejora en el desempeño del sistema y se realiza una comparación entre un sistema con transmisión ordinaria (no oportunista) y un sistema que emplea transmisión oportunista. Los resultados fueron obtenidos a través de simulaciones realizadas en el software MATLAB utilizando el método de Monte-Carlo. Los resultados muestran que un sistema que emplea transmisión oportunista elimina casi en su totalidad los efectos del desvanecimiento para las modulaciones mencionadas. Las modulaciones no cuadradas utilizadas para este análisis presentan una notable mejoría frente a las modulaciones cuadradas, ya que el orden de la modulación aprovecha de manera eficiente el ancho de banda disponible, pues se puede enviar una mayor cantidad de bit por cada símbolo transmitido. Además, se presentan varias figuras que ilustran la BER del sistema considerando diferentes umbrales de transmisión. Adicionalmente, se presentan diagramas de ojo y constelaciones para las modulaciones no cuadradas como 8-QAM y 32-QAM en diferentes escenarios de operación.

Palabras claves: Modulaciones no cuadradas, sistemas oportunistas, desvanecimiento plano-lento tipo Rayleigh, constelación, diagrama de ojo, ruido blanco aditivo gaussiano, probabilidad de error de bit.

ABSTRACT

In the present project, he analyzes the performance of a wireless system that uses opportunistic transmission with non-square modulations 8-QAM and 32-QAM. This analysis considers a channel with Gaussian additive white noise and flat-slow Rayleigh type fading. For this, the mechanism of the system with opportunistic transmission establishes transmission thresholds which depend on the probability of transmission that is required. The performance analysis for the proposed system is based on the bit error probability (BER). With this parameter the improvement in the performance of the system is verified and a comparison is made between a system with ordinary transmission (not opportunistic) and a system that uses opportunistic transmission. The results were obtained through simulations carried out in the MATLAB software using the Monte-Carlo method. The results show that a system that employs opportunistic transmission almost completely eliminates the effects of fading for the aforementioned modulations. The non-square modulations used for this analysis show a marked improvement over square modulations, since the order of the modulation efficiently exploits the available bandwidth, since a greater amount of bit can be sent for each transmitted symbol. In addition, several figures are presented that illustrate the BER of the system considering different transmission thresholds. Additionally, eye diagrams and constellations for non-square modulations such as 8-QAM and 32-QAM are presented in different operating scenarios.

Keywords: Non-square modulations, opportunistic systems, plane-slow fading Rayleigh type, constellation, eye diagram, Gaussian additive white noise, bit error probability

ÍNDICE

1.	CAPÍTULO I. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	1
1.1	Introducción	1
1.2	Antecedentes y Justificación.....	1
1.3	Esquemas de Modulación Digital.....	2
1.3.1	Modulación PAM.....	3
1.3.2	Modulación BPSK.....	4
1.3.3	Modulación M-QAM	5
1.3.4	Modulaciones QAM No Cuadradas	5
1.4	Constelación y Mapeamiento Gray	7
1.5	Desvanecimiento tipo Rayleigh.....	7
1.6	Diagrama de Ojo	8
1.7	Probabilidad de Error de Bit Media	9
1.6.1	Probabilidad de Error de Bit en Canal con Ruido Aditivo.....	10
1.6.2	Probabilidad de Error de Bit Media en Canales con Desvanecimiento	11
2.	CAPITULO II. DISEÑO Y DESARROLLO	12
2.1	Descripción del Sistema	13
2.1.1	Mecanismo de transmisión oportunista empleando modulación no cuadrada.....	16
2.2	Probabilidad de error de bit de un sistema oportunista	19
2.3	Consideraciones para Implementación de Algoritmo de Simulación	20
3.	CAPITULO III. ANÁLISIS DE RESULTADOS	23
3.1	Análisis de la BER considerando modulación 8-QAM no cuadrada.....	24

3.2	Análisis de la BER considerando modulación 32-QAM no cuadrada.....	25
3.3	Comparación de la BER de sistemas oportunistas que usan modulaciones QAM no cuadradas y modulaciones QAM cuadradas.....	27
3.4	Diagramas de constelación para un sistema con transmisión oportunista que emplea modulaciones no cuadradas.....	29
4.	CAPITULO IV. COMPARACIÓN ENTRE SISTEMAS OPORTUNISTAS Y ORDINARIOS	30
4.1	Comparación usando modulación no cuadrada 8-QAM....	30
4.2	Comparación usando modulación no cuadrada 32-QAM..	32
4.3	Diagrama de símbolos recibidos.....	34
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	35
5.1	Conclusiones.....	35
5.2	Recomendaciones.....	36
	REFERENCIAS.....	38
	ANEXOS	40

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.</i> Forma de onda para modulaciones con amplitud de pulsos variables.	4
<i>Figura 2.</i> Constelación para modulación 8QAM no cuadrada.	7
<i>Figura 3.</i> Simulación de desvanecimiento Rayleigh PDF para varianza = 0,5.	8
<i>Figura 4.</i> Modelo de detección de señales binarias para un canal con presencia de ruido aditivo blanco gaussiano y transmisión oportunista.	15
<i>Figura 5.</i> Diagrama de composición de señales binarias compuestas para modulaciones no cuadradas 8-QAM y 32-QAM.	15
<i>Figura 6.</i> Mecanismo de transmisión oportunista considerando que $\alpha \geq u$.	16
<i>Figura 7.</i> Mecanismo de un sistema de transmisión oportunista considerando que $\alpha < u$.	17
<i>Figura 8.</i> Comparación entre un sistema de transmisión oportunista y un sistema de transmisión ordinaria.	18
<i>Figura 9.</i> Sintaxis de comparación y funcionamiento de la función biterr en MATLAB.	22
<i>Figura 10.</i> BER en función de la relación señal ruido media considerando modulación 8-QAM en un sistema oportunista que usa probabilidad de transmisión $P_{tx} = 1/2$.	25
<i>Figura 11.</i> BER media en función de la relación señal ruido media considerando modulación 32-QAM en un sistema oportunista con probabilidad de transmisión $P_{tx} = 1/2$.	26
<i>Figura 12.</i> BER en función de la relación señal ruido media considerando modulaciones cuadradas 16-QAM y 64-QAM en un sistema con transmisión oportunista que considera probabilidad de transmisión $P_{tx} = 1/2$.	27
<i>Figura 13.</i> Diagramas de constelación mostrando los símbolos recibidos parametrizado por el orden de la modulación en un sistema con transmisión oportunista.	29
<i>Figura 14.</i> Probabilidad de error de bit en función de la relación señal ruido media (γ_b) considerando modulación 8-QAM	

parametrizado por el tipo de transmisión. Para transmisión oportunista $P_{tx} = 1/2$	31
<i>Figura 15.</i> Probabilidad de error de bit en función de la relación señal ruido media (γ_b) considerando modulación 32-QAM parametrizado por el tipo de transmisión. Para transmisión oportunista $P_{tx} = 1/2$	33
<i>Figura 16.</i> Diagramas de constelación de los símbolos recibidos en un sistema con transmisión oportunista y un sistema de transmisión ordinaria considerando $E_b/N_0 = 10$ dB y parametrizado por el esquema de modulación.....	34
<i>Figura 17.</i> Diagramas de constelación de los símbolos recibidos en un sistema con transmisión oportunista y un sistema de transmisión ordinaria considerando $E_b/N_0 = 20$ dB y parametrizado por el esquema de modulación.....	35

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros y valores para un sistema de transmisión oportunista cuando la amplitud del desvanecimiento se encuentra por encima del umbral (u_2).....	17
Tabla 2. Parámetros y valores comparativos en un sistema que emplea transmisión oportunista cuando la amplitud del desvanecimiento se encuentra por encima del umbral (u_2) = $1/2$ y modulaciones no cuadradas 8-QAM y 32-QAM.....	28
Tabla 3. Parámetros y valores comparativos de un sistema que emplea transmisión oportunista cuando la amplitud del desvanecimiento se encuentra por encima del umbral (u) = $1/2$ y un sistema con transmisión ordinaria.	30
Tabla 4. Parámetros y valores comparativos de un sistema que emplea transmisión oportunista cuando la amplitud del desvanecimiento se encuentra por encima del umbral (u) = $1/2$ y un sistema con transmisión ordinaria.	32

1. CAPÍTULO I. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

1.1 Introducción

Actualmente, el desarrollo de la tecnología para comunicaciones inalámbricas es muy rápida. Muchos usuarios necesitan una mayor velocidad de comunicación de datos por lo que se necesita gran ancho de banda para soportar el desarrollo de este tipo de comunicaciones. El ancho de banda del sistema está determinado por la tasa de símbolos transmitidos. Sin embargo, este ancho de banda se puede ver afectado o mejorado conforme el orden de la modulación usado, el cual es muy sensible a efectos del ruido blanco aditivo gaussiano y a otros factores como el desvanecimiento en el canal. El desempeño del sistema depende específicamente del tipo de modulación. Hoy en día, constelaciones no cuadradas son ampliamente utilizadas en comunicaciones inalámbricas ya que dichas constelaciones tienen una fluctuación de amplitud menor comparado con las de tipo cuadradas. Así podemos establecer que, el orden más alto de la constelación no cuadrada se puede utilizar efectivamente para mejorar la eficiencia de uso del ancho de banda en comunicaciones de alta velocidad. No obstante, esto genera un problema en el lado del receptor ya que se necesita mayor tiempo de procesamiento y algoritmos más robustos para demodular la señal transmitida y los símbolos recibidos. En este trabajo, hemos propuesto un sistema de transmisión oportunista que emplea modulaciones no cuadradas como 8-QAM y 32-QAM, considerando así las mejoras de este tipo de modulaciones con relación al ancho de banda y el aprovechamiento más eficiente del canal, mitigando así los efectos destructivos del desvanecimiento.

1.2 Antecedentes y Justificación

El incremento de los servicios en las comunicaciones móviles ha exigido de manera constante a los proveedores de estas tecnologías una evolución significativa que satisfaga las necesidades de velocidad y comunicación requeridas en la actualidad. Esto conlleva a un crecimiento de infraestructura en los medios de transmisión, así como en aquellos de ámbito científico y

tecnológico en busca de mejoras para transmisiones de alta velocidad y que vayan acorde a la evolución de las nuevas comunicaciones móviles.

Existen un sin número de investigaciones cuyo objetivo ha sido el de mejorar el rendimiento de la comunicación entre el transmisor y receptor, en dónde se ven involucrados varios factores que afectan al sistema, tales como, el ruido, desvanecimiento e interferencia. En la actualidad, las constelaciones no cuadradas son mostradas en cierta manera inferiores a los de forma cuadrada, ya que no aprovechan el espacio entre los puntos de la constelación. Sin embargo, logran notablemente mejorar la tasa de error bit, pero tienen una desventaja, ya que son más difíciles de decodificar. Un sistema que emplea transmisión oportunista considera de manera más eficiente el envío de información en los periodos de tiempo. Cuando el desvanecimiento propio de un canal inalámbrico no es destructivo para la señal, el sistema oportunista establece un umbral en base a estadísticas. Para esto, el transmisor debe conocer la amplitud instantánea del desvanecimiento.

1.3 Esquemas de Modulación Digital

En un sistema de transmisión digital el flujo de bits en el transmisor se genera inicialmente en banda base, por lo que es necesario trasladar el espectro a una frecuencia mayor utilizando una portadora. Este proceso se conoce como modulación y es la principal función que cumple un modulador en el dispositivo transmisor, es decir, la modulación digital es el proceso por el cual los símbolos emitidos de manera digital son transformados en formas de onda compatibles con cada una de las características del canal o medio de transmisión.

En el receptor se realiza el proceso contrario al proceso de modulación y se conoce como demodulación, el cual consiste en recuperar los símbolos transmitidos. Las señales ingresan al sistema, se dividen y cada lado se aplica a un mezclador, una mitad tiene el oscilador local en fase aplicado y la otra mitad tiene la señal de oscilador en cuadratura aplicada. El modulador básico asume que las dos señales permanecen en cuadratura y un requisito adicional es derivar

una señal de oscilador local para la demodulación que se encuentra exactamente en la frecuencia requerida para la señal. Cualquier desplazamiento de frecuencia será un cambio en la fase de la señal del oscilador local con respecto a los dos constituyentes de la portadora suprimida de banda lateral doble de la señal general. Los sistemas incluyen circuitos para recuperación de portadoras que a menudo utilizan un bucle de bloqueo de fase; algunos incluso tienen un bucle interno y externo. La recuperación de la fase de la portadora es importante, de lo contrario, la tasa de error de bits para los datos se verá comprometida.

Las formas de onda se pueden representar gráficamente a través de un diagrama de constelación, que será descrito en la sección 1.3. Para comprender el análisis realizado en los próximos capítulos, es necesario estudiar esquemas de modulación más comunes que se emplean en los sistemas inalámbricos y serán descritos a continuación.

1.3.1 Modulación PAM

La modulación de amplitud de pulsos es un esquema que altera la amplitud de los pulsos rectangulares espaciados regularmente de acuerdo con los valores instantáneos de una señal de mensaje continuo. Entonces, la amplitud de los pulsos modulados representa un símbolo generado a partir de un grupo de bits. Se usa un tren de pulsos muy cortos de amplitud constante y velocidad de repetición rápida. La amplitud de cada pulso pertenece a un grupo de amplitudes que conforman la constelación de la modulación que puede ser descrita como:

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

(Ecuación 1)

dónde A_k es la amplitud del k -enésimo símbolo transmitido que pertenece a una constelación formada por M símbolos o amplitudes, T_s es la duración del símbolo y $g(t)$ es un pulso banda-base que satisface el criterio de Nyquist.

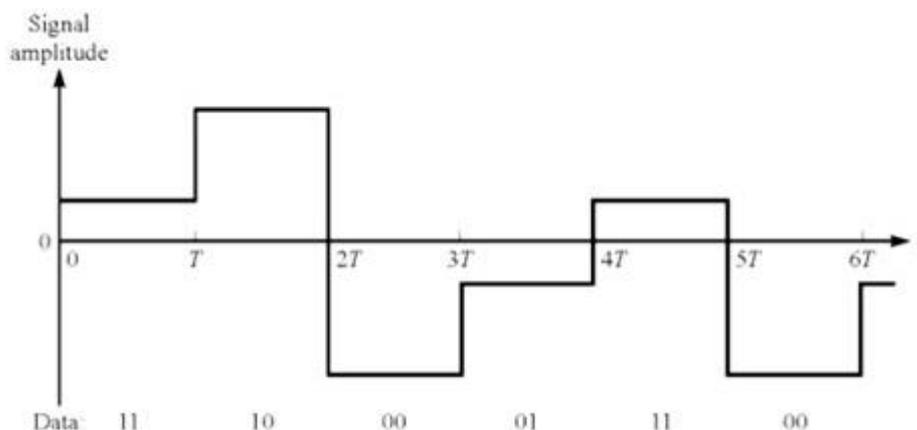


Figura 1. Forma de onda para modulaciones con amplitud de pulsos variables.

1.3.2 Modulación BPSK

La modulación por bit de desplazamiento de fase (del inglés: Binary Phase Shift Keying – BPSK) es un método versátil y ampliamente utilizado para transferir datos digitales de forma inalámbrica. Esta varía la fase de la portadora dependiendo del bit que va a ser transmitido, es decir que su amplitud y frecuencia no son alteradas. Por lo tanto, utiliza dos fases, cada una atribuida a una combinación de dígitos binarios. Las dos formas de ondas bipolares de amplitud A son usadas de tal manera que la fase de la primera portadora se encuentra en 0° cuando se envía el bit 1 de información y la segunda se genera en 180° cuando se emite un bit equivalente a 0. En la Figura 2 se puede observar la constelación formada para la modulación BPSK y puede ser escrita matemáticamente como:

$$s_c(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} Ag(t - kT_s) \cos[2\pi f_c(t - kT_s) + \pi b_k]$$

(Ecuación 2)

dónde $g(t)$ es el pulso en banda base, A representa la amplitud de la portadora y $b_k = 1$ ó $b_k = 0$. Para los esquemas de modulación BPSK se conoce que la duración del bit es igual a la duración del símbolo, es decir $T_b = T_s$. (Kim, 2006)

1.3.3 Modulación M-QAM

La modulación de amplitud en cuadratura (QAM) es una técnica que combina las variaciones de amplitud y fase en una portadora al mismo tiempo. Lo que esta técnica hace es permitir tasas de datos más altas dentro del mismo ancho de banda y consiste en transmitir múltiples bits para cada intervalo de tiempo del símbolo de la portadora. El término "símbolo" significa una combinación única de fase y amplitud, así una constelación M-QAM transmite $\log_2 M$ bits en cada intervalo de tiempo o símbolo para cada combinación única de amplitud / fase. De esta manera, la constelación M-QAM tiene M símbolos y necesita menos energía por símbolo que las modulaciones de amplitud. Una señal M-QAM puede ser escrita como:

$$s_c(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} x_i g(t - iT_s) \cos[2\pi f_c(t - iT_s)] - \sum_{q=-\infty}^{\infty} x_q g(t - qT_s) \sin[2\pi f_c(t - qT_s)]$$

(Ecuación 3)

Donde x_i y x_q son las señales PAM independientes que asumen los valores de $\pm A, \pm 3A, \dots, \pm (\sqrt{M}-1) A$.

La forma más simple de QAM es 4-QAM, también conocida como modulación en fase por desplazamiento en cuadratura fásico (del inglés: quadrature phase shift keying – QPSK). En sistemas móviles actuales, las modulaciones más utilizadas son 4-QAM, 16-QAM y 64-QAM.

1.3.4 Modulaciones QAM No Cuadradas

Las constelaciones M-QAM se pueden construir de muchas maneras diferentes y tienen diferentes características de capacidad, así como de desempeño. Aunque las constelaciones rectangulares, circulares y cuadradas son comunes en la práctica; un cierto tipo de constelación puede diseñarse para lograr el mejor desempeño de comunicación bajo algunas premisas específicas.

A continuación, consideremos 8QAM y 32 QAM que, para ambos casos, existen muchas posibles constelaciones de señales. Todas las posibles constelaciones constan de dos amplitudes y tiene una distancia mínima entre los puntos de la constelación. Suponiendo que las coordenadas para cada punto (símbolo) de la constelación son: (A_{mc}, A_{ms}) , la potencia media de la señal transmitida es:

$$P_{av} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (A_{mc}^2 + A_{ms}^2)$$

(Ecuación 4)

Muchos sistemas de transmisión de datos migran entre los diferentes órdenes de QAM, 8QAM, 32QAM, etc., dependiendo de las condiciones del enlace. Si hay un buen margen, se pueden usar órdenes más altas de QAM no cuadradas como 32QAM que envía 5 bits por símbolo que proviene de la operación $M = 2^5$ para obtener una velocidad de datos más rápida, pero si el enlace se deteriora, se usan órdenes más bajas como 8QAM que envía 3 bits por símbolo, cuyo valor se obtiene a partir de $M = 2^3$ para preservar el margen de ruido y asegurar que se mantenga una tasa de error de bits baja. A medida que aumenta el orden QAM, la distancia entre los diferentes puntos en el diagrama de constelación disminuye y hay una mayor posibilidad de que se introduzcan errores de datos. Para utilizar el formato 32QAM de alto orden, el enlace debe tener una muy buena relación E_b/N_0 de lo contrario habrá errores de datos. Cuando la E_b/N_0 se deteriora, luego debe aumentarse el nivel de potencia, o debe reducirse el orden QAM si se desea conservar la tasa de error de bits.

Por consiguiente, se debe hacer un balance entre la velocidad de datos y el orden de modulación QAM, la potencia y la tasa de error de bits aceptable. Si bien se puede introducir una corrección de errores adicional para mitigar cualquier deterioro en la calidad del enlace, esto también disminuirá el rendimiento de los datos.

1.4 Constelación y Mapeamiento Gray

La codificación de Gray se utiliza con diferentes esquemas de modulación. Con este esquema, los bits se asignan a los símbolos de modo que los símbolos más cercanos difieran en un solo bit, lo que reduce la BER.

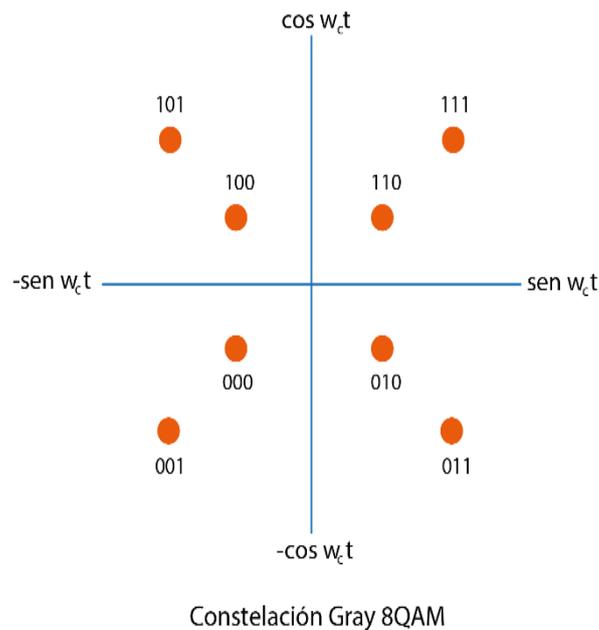


Figura 2. Constelación para modulación 8QAM no cuadrada.

1.5 Desvanecimiento tipo Rayleigh

El desvanecimiento de Rayleigh es un modelo que se puede usar para describir la forma que se produce cuando existe la propagación por trayectos múltiples. En cualquier entorno terrestre, una señal de radio viajará a través de una serie de rutas diferentes desde el transmisor al receptor. El camino más obvio es el camino directo o de línea de vista. Sin embargo, habrá muchos objetos alrededor del camino directo. Estos objetos pueden servir para reflejar, refractar, etc. la señal. Como resultado de esto, hay muchas otras rutas por las cuales la señal puede llegar al receptor y que solo pueden ser identificados de manera estadística. Así para un escenario sin línea de vista, se generan variables aleatorias Gaussianas complejas, cuyas componentes están distribuidas de forma idéntica y son independientes. La envolvente de esta variable aleatoria

Gaussiana compleja se puede modelar como una variable aleatoria de tipo Rayleigh. Esta variable se multiplica al símbolo transmitido en el canal de comunicaciones y se conoce como desvanecimiento. La función de densidad de probabilidad (PDF) de una variable aleatoria Rayleigh es:

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

(Ecuación 5)

La cual se muestra en la Figura 3.

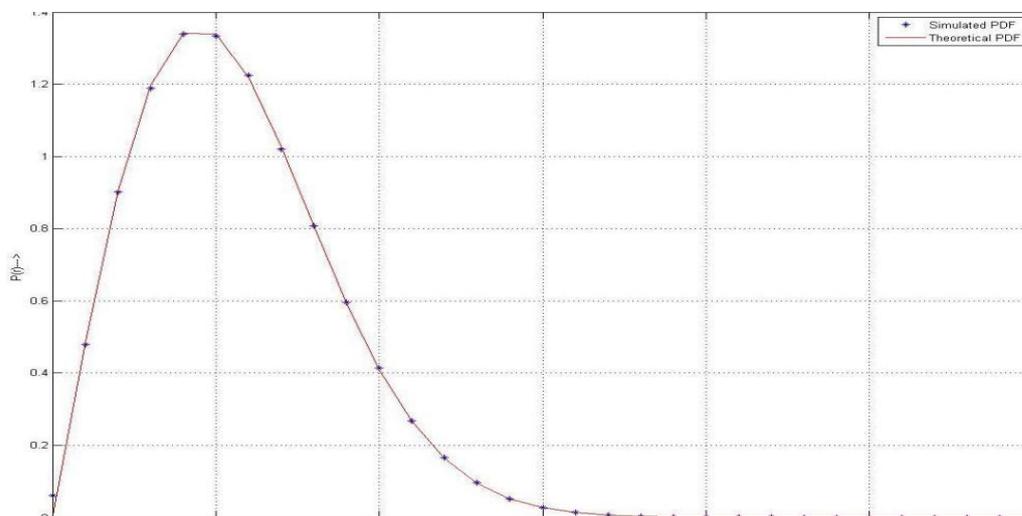


Figura 3. Simulación de desvanecimiento Rayleigh PDF para varianza = 0,5.

1.6 Diagrama de Ojo

Los diagramas de ojo son un medio visual que ayuda a identificar rápidamente si existen problemas de integridad de la señal antes de pasar a un análisis más refinado. Los diagramas de ojo ayudan con el análisis efectivo de los datos en serie, y ofrecen una visión tanto cualitativa como cuantitativa con respecto a la ruta de la señal de las comunicaciones de datos y lo que podría estar afectando la integridad de la señal. Así también, el diagrama mencionado es un patrón que se muestra en un osciloscopio que muestra una vista más completa de cómo se ve un flujo de señal digital desde un punto de vista más holístico y lo que realmente está sucediendo en el lado del receptor, o muestreador.

Un diagrama de ojo puede ver fácilmente los márgenes de ruido de la señal de datos y si el ruido supera los límites ideales o aún se encuentra dentro de un rango aceptable. El intervalo de unidades o el período de bits de un diagrama de ojo está definido por el reloj de datos. Como se mencionó anteriormente, el diagrama del ojo muestra todos los valores, que están en posiciones variables debido al ruido u otros factores, que una señal digital toma durante un período de bits. El ruido y otros factores pueden hacer que la señal digital se desvíe de un tren de funciones de pasos perfectos en un flujo de 0 y 1, y esto se muestra de forma acumulativa en el diagrama del ojo. Un diagrama de ojo cerrado indica una señal ruidosa e impredecible.

1.7 Probabilidad de Error de Bit Media

En transmisiones digitales, la probabilidad de error de bit (del inglés: Bit Error Probability – BER) es el porcentaje de bits con errores dividido por el número total de bits que se han transmitido, recibido o procesado durante un período de tiempo determinado. La tasa se expresa típicamente como 10 a la potencia negativa. Por ejemplo, cuatro bits erróneos de 100.000 bits transmitidos se expresarían como 4×10^{-5} , o la expresión 3×10^{-3} , indicaría que tres bits tenían un error de 1,000,000 transmitidos. BER es el equivalente digital a la relación señal / ruido en un sistema analógico.

Las relaciones señal a ruido y las cifras E_b / N_0 son parámetros que están más asociados con los enlaces de radio y los sistemas de comunicaciones de radio digitales, donde $\text{erf}(\cdot)$, la energía en un bit es E_b y N_0 es la densidad espectral de potencia de ruido que es la potencia de ruido en un ancho de banda de 1 Hz.

En particular, los esquemas de modulación de orden superior, por ejemplo: 32-QAM o 64-QAM pueden transportar velocidades de datos altas, pero no son tan robustos en presencia de ruido. Los formatos de modulación de orden inferior (por ejemplo, BPSK, QPSK, etc.) ofrecen tasas de datos más bajas, pero son más robustos.

Es posible definir la BER en términos de probabilidad de error.

$$\text{erf}(x) = \frac{1}{2} \text{erf} \left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}} \right)$$

(Ecuación 6)

dónde erf (.) denota la función de error. (McGraw-Hill, 1991)

1.6.1 Probabilidad de Error de Bit en Canal con Ruido Aditivo

El análisis de la BER en un canal con ruido aditivo blanco gaussiano, considera la relación señal-ruido. Como el intervalo de un bit es la tasa de bit R_b , las cuales son recíprocas, entonces, podemos escribir T_b como $1 / R_b$, y por lo tanto:

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

(Ecuación 7)

En donde E_b/N_0 es proporcional a la relación S/N e inversamente proporcional a la eficiencia espectral, por tanto:

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{S}{N} \left(\frac{B}{R_b} \right)$$

(Ecuación 8)

La probabilidad de error de símbolo para modulaciones M-QAM cuadradas en canales con AWGN, se encuentra definida por:

$$P_s = \frac{2(\sqrt{M} - 1)}{\sqrt{M}} \text{erfc} \left(\sqrt{\frac{3 \log_2 M}{2(M-1)} \frac{E_b}{N_0}} \right)$$

(Ecuación 9)

1.6.2 Probabilidad de Error de Bit Media en Canales con Desvanecimiento

El desvanecimiento puede ser considerado como plano-lento. Cuando no varía en amplitud, ni en fase dentro de un intervalo de símbolo. No obstante, como el desvanecimiento varía con el tiempo de símbolo a símbolo, la relación señal-ruido y la probabilidad de error de bit también varían. Pero en la presencia de la relación señal-ruido instantánea es definida como:

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

(Ecuación 10)

dónde α es la amplitud instantánea del desvanecimiento para el cálculo de la probabilidad de error de bit media que el desvanecimiento puede ser establecida como una variable aleatoria Rayleigh. En este caso la BER media se calcula usando:

$$\bar{P}_s = \int_0^\alpha P_{(s|x)}(\alpha) d\alpha$$

(Ecuación 11)

dónde $P_{(s|x)}$ es la probabilidad de error de bit condicionada al valor instantáneo del desvanecimiento y $f(x)$ es la PDF dada por la ecuación (MacKay, 1997).

Para modulaciones M-QAM tenemos que:

$$P_{(s|x)} = \frac{2(\sqrt{M} - 1)}{\sqrt{M}} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{3 \log_2 M}{2(M-1)} \alpha^2 \frac{E_b}{N_0}} \right)$$

(Ecuación 12)

Por lo tanto, reemplazando la Ecuación 14 en la Ecuación 12, tenemos que la ecuación 8 no es integral. La probabilidad de error de bit para modulaciones QAM es igual a:

$$\bar{P}_s \approx 2 \left(1 - \sqrt{\frac{\frac{3 \log_2 M}{2} \frac{\gamma_b}{M-1}}{1 + \frac{3 \log_2 M}{2} \frac{\gamma_b}{M-1}}} \right),$$

(Ecuación 13)

Suponiendo que se encuentra en codificación Gray, la probabilidad de error de bit puede ser aproximada como:

$$\bar{P}_s \approx \frac{\bar{P}_b}{\log_2 M}$$

(Ecuación 14)

2. CAPITULO II. DISEÑO Y DESARROLLO

Actualmente, nos encontramos inmersos en un entorno de revolución tecnológica de los sistemas de comunicación inalámbrica, los cuales nos proporcionan ventajas referentes a los sistemas de comunicación por cable, sin embargo, conforme a los avances tecnológicos, la demanda va aumentando por la oferta de estos servicios de portabilidad, flexibilidad y mayores velocidades. No obstante, se ven afectados por factores como el ruido, desvanecimiento e interferencia, los cuales deterioran a la señal transmitida por un canal inalámbrico y consecuentemente la información enviada desde el transmisor tiende a ser recibida de manera errónea en el lado del receptor. La cantidad de bits recibidos erróneamente, como se menciona en capítulos anteriores, puede ser cuantificada por medio de una probabilidad la cual es conocida como tasa de error de bit, cuya unidad de medida es de tipo adimensional. Con esta probabilidad se puede analizar el rendimiento del sistema considerando diferentes esquemas de modulación, codificación y de transmisión.

Existen varios estudios realizados con el fin de mejorar el rendimiento de los sistemas de comunicación en términos de la probabilidad de error de bit y de transmisión oportunista. Sin embargo, se analizó la literatura existente y no se encontró un análisis de desempeño similar al planteado, es decir, analizar un

sistema oportunista con adición de ruido blanco gaussiano, presencia de desvanecimiento tipo Rayleigh y modulaciones no cuadradas en el orden de 8QAM y 32 QAM. A continuación, se presentará la estructura de un sistema ordinario y de un sistema que emplea transmisión oportunista. Si el transmisor detecta que la amplitud del desvanecimiento está debajo del valor establecido (umbral), no se realiza ningún proceso de envío de información. Por otra parte, cuando la amplitud del desvanecimiento está por encima del umbral, entonces se realiza la transmisión, de esta manera es posible aprovechar de manera efectiva este fenómeno conocido como desvanecimiento en la transmisión de sistema oportunistas.

2.1 Descripción del Sistema

En la presente sección se describe la estructura de un sistema con transmisión ordinaria y otro de transmisión oportunista, el cual es representado por el diagrama de bloques mostrado en la Figura 4, en donde consta un transmisor que genera bits aleatorios, x_k , que adquieren valores de 0 y 1 con la misma probabilidad. Estos bits son mapeados y convertidos en símbolos complejos, s_k , los cuales pertenecen a las constelaciones de símbolos QAM mapeadas con codificación Gray. Consecuente, el símbolo s_k ubicado en la salida del mapeador, pasa por un filtro banda - base formateador de pulsos $p(t)$ que cumplen el criterio de Nyquist. Luego la portadora es incluida. Se considera que las señales en fase $I(t)$ y cuadratura $Q(t)$ enviadas por el transmisor contienen las componentes de las modulaciones no cuadradas 8-QAM y 32-QAM. Las componentes son generadas por un modulador en la misma portadora de frecuencia f_c con un desfase de 90° de manera sinusoidal de seno y coseno, mismos que son indicados a continuación:

$$\begin{aligned}\varphi_I(t) &= \sqrt{2}p(t)\cos(2\pi t) \\ \varphi_Q(t) &= \sqrt{2}p(t)\sin(2\pi t),\end{aligned}$$

(Ecuación 15)

en donde $p(t)$ es el pulso banda-base y el factor $\sqrt{2}$ normaliza la potencia transmitida con energía unitaria. Por tanto, la señal transmitida $s(t)$ se puede escribir como:

$$s(t) = I(t)\sqrt{2}p(t)\cos(2\pi) - Q(t)\sqrt{2}p(t)\sin(2\pi)$$

(Ecuación 16)

En donde $I(t)$ es la componente en fase:

$$I(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} S_{k,p}(t - kT_s)$$

(Ecuación 17)

Dónde $S_{k,p}$ es la componente en fase del símbolo transmitido.

Y $Q(t)$ es la componente en cuadratura de la señal:

$$Q(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x_{k,q} p(t - kT_s)$$

(Ecuación 18)

dónde $x_{k,q}$ es la componente en cuadratura del símbolo transmitido. Además, hemos establecido que $x_k = As_k$ dónde A es la amplitud de la señal transmitida, T_s es la duración de símbolo, $R_s = 1/T_s$ es la tasa de símbolo.

Consideremos que la señal transmitida de un usuario $s(t)$ se envía de forma oportunista por un canal con ruido blanco de tipo gaussiano y desvanecimiento plano-lento que sigue una distribución de tipo Rayleigh. En este caso la señal recibida en función del tiempo se puede escribir como:

$$r(t) = \alpha(t) s(t) + n(t),$$

(Ecuación 19)

en donde $\alpha(t)$ representa el desvanecimiento plano y lento, $n(t)$ es el ruido aditivo blanco gaussiano con varianza $\sigma^2 = N_0 R_s$, en donde N_0 es la densidad espectral unilateral de la potencia del ruido.

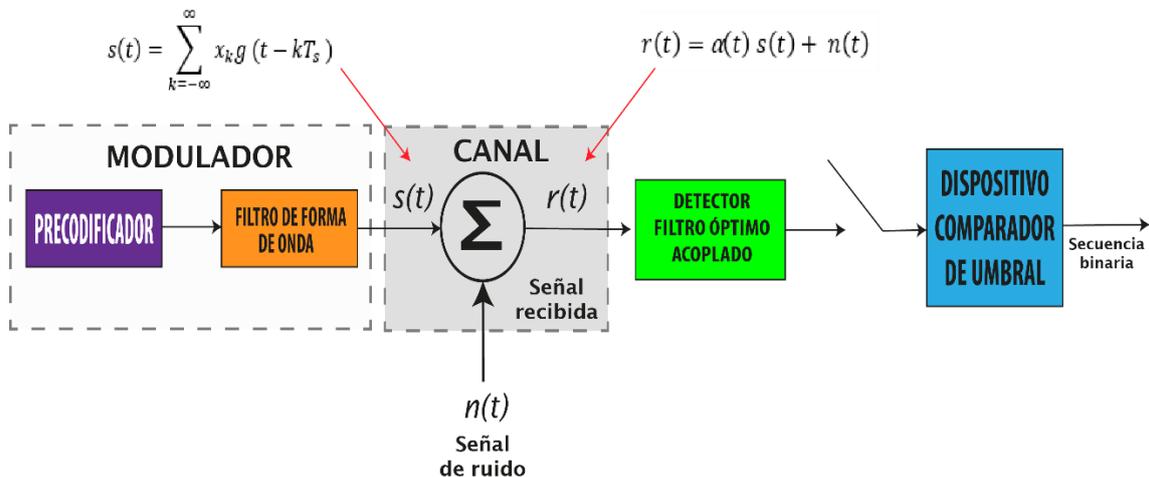


Figura 4. Modelo de detección de señales binarias para un canal con presencia de ruido aditivo blanco gaussiano y transmisión oportunista.

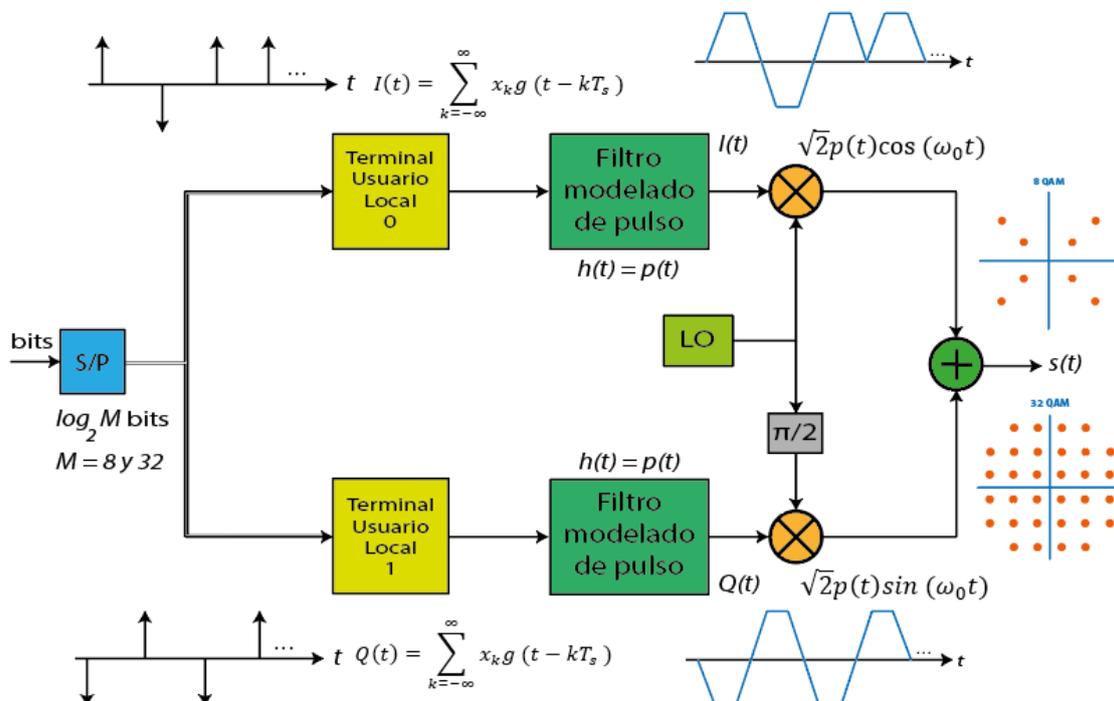


Figura 5. Diagrama de composición de señales binarias compuestas para modulaciones no cuadradas 8-QAM y 32-QAM.

2.1.1 Mecanismo de transmisión oportunista empleando modulación no cuadrada

En esta sección describiremos el mecanismo de transmisión oportunista, en donde el receptor es el encargado de informar al transmisor que la amplitud del desvanecimiento se encuentra por encima del umbral establecido y en este caso se continúa con el proceso de transmisión, caso contrario, cuando la amplitud del desvanecimiento se encuentra por debajo del umbral deseado, el transmisor no envía información y estos datos son almacenados en un *buffer*. El desarrollo de toda esta sucesión de condiciones se realiza por medio de un canal de realimentación. Como consecuencia, existen momentos en los cuales el transmisor se encuentra en modo de espera o también llamado de silencio cuando el desvanecimiento se encuentra por debajo del umbral establecido.

A continuación, se muestran algunos escenarios relacionados con la transmisión oportunista:

En el escenario de la Figura 6, el usuario de interés envía información siempre y cuando la amplitud del desvanecimiento se encuentre por encima del umbral establecido, es decir, cuando $\alpha \geq u$.

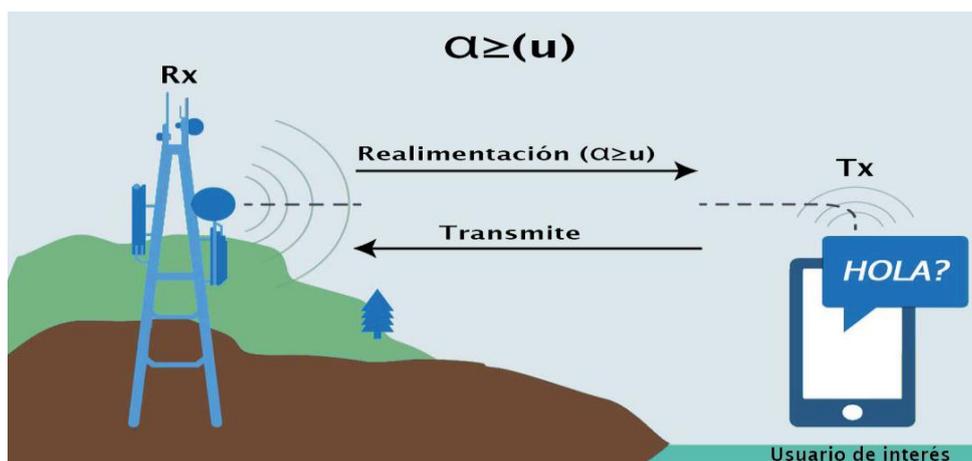


Figura 6. Mecanismo de transmisión oportunista considerando que $\alpha \geq u$.

Para el segundo caso, en la Figura 7 se puede evidenciar que el usuario de interés no transmite, ya que la amplitud del desvanecimiento se encuentra por debajo del umbral, es decir, $\alpha < u$.

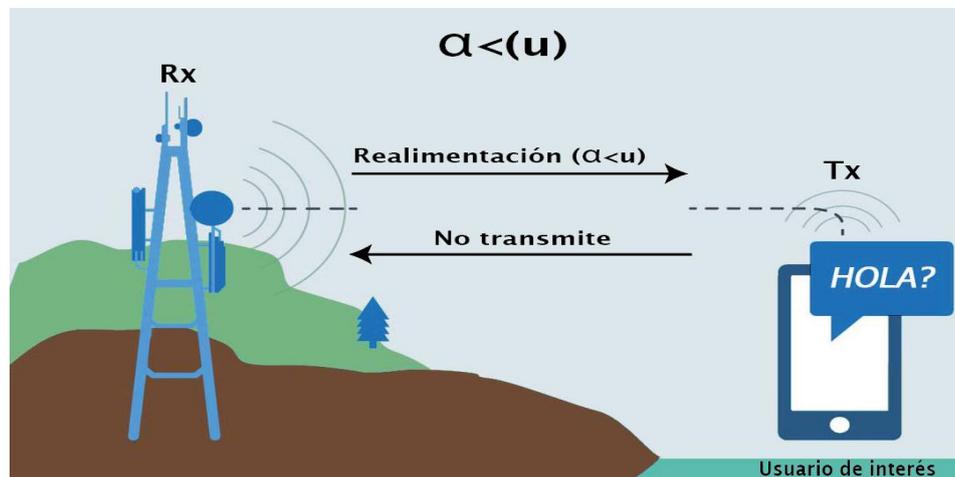


Figura 7. Mecanismo de un sistema de transmisión oportunista considerando que $\alpha < u$.

La probabilidad de no transmisión en un sistema oportunista es obtenida como:

$$P_{tx} = \int_0^m \frac{\alpha}{\sigma^2} e^{-\alpha^2/2\sigma^2} d\alpha = 1 - e^{-m^2/2\sigma^2}$$

(Ecuación 20)

De la Ecuación 21 se pueden obtener valores de esta probabilidad, los cuales se muestran en la Tabla 1, donde se establecen varios umbrales de no transmisión.

Tabla 1

Parámetros y valores para un sistema de transmisión oportunista cuando la amplitud del desvanecimiento se encuentra por encima del umbral (u_2).

Umbrales	Probabilidad transmisión (P_{tx})	Probabilidad no transmisión
$u1 = 0,832$	1/2	1/2
$u2 = 1,048$	1/3	2/3
$u3 = 1,177$	1/4	3/4
$u4 = 1,268$	1/5	4/5

En la Figura 8 se puede evidenciar el funcionamiento de un sistema ordinario y un sistema oportunista en donde este último compensa no transmisión, incrementando la tasa de símbolos en los periodos de transmisión. Esto se realiza conforme a la probabilidad de transmisión establecida. Si como ejemplo consideramos una probabilidad de transmisión $P_{tx} = 1/3$, consecuentemente, la de probabilidad de no transmisión es establecemos $P_{ntx} = 2/3$. En este caso la amplitud del desvanecimiento en los períodos de transmisión se encuentra por encima del umbral $u2 = 1,048$.

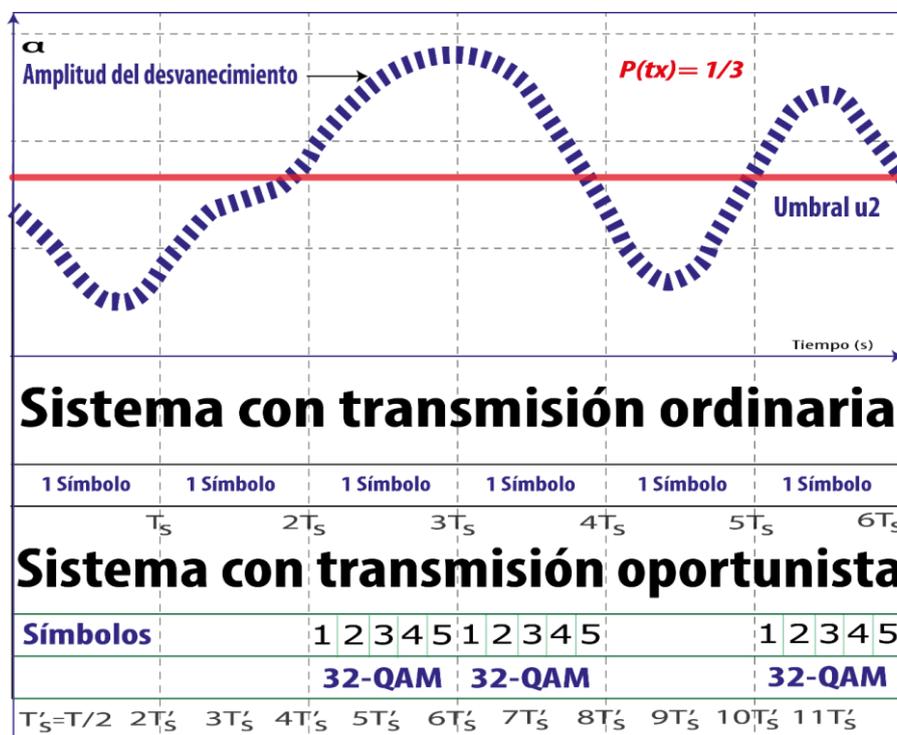


Figura 8. Comparación entre un sistema de transmisión oportunista y un sistema de transmisión ordinaria.

2.2 Probabilidad de error de bit de un sistema oportunista

En esta sección analizaremos el rendimiento de un sistema oportunista en base a la media BER. Con este fin, en primer lugar, podemos establecer la relación de señal-ruido por bit instantánea, la cual está definida por:

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

(Ecuación 21)

dónde $\frac{E_b}{N_0} = \frac{A^2 T_b}{N_0}$, es la relación obtenida a partir de la energía por bit $E_b = \frac{A^2 T_b}{2}$,

y la densidad espectral de la potencia del ruido y la variable aleatoria α representa la amplitud instantánea del desvanecimiento.

Para un sistema de transmisión oportunista la probabilidad de error de símbolo (SER) media puede calcularse promediando los valores del desvanecimiento, para esto empleamos la función densidad de la probabilidad (PDF) del desvanecimiento de tipo Rayleigh en el proceso de transmisión. Es decir, que la probabilidad de error de símbolo para un sistema oportunista puede ser calculada por medio de:

$$\bar{P}_s = \int_u^\infty P(s | \alpha) f(\alpha | \alpha > u) d\alpha$$

(Ecuación 22)

En donde $P(s | \alpha)$ es la probabilidad de error de símbolo condicionada al valor del desvanecimiento instantáneo en un canal con presencia de ruido blanco aditivo gaussiano y $f(\alpha | \alpha > u)$ es la PDF del desvanecimiento condicionada a que el mismo se encuentre sobre el umbral y es dada por la (Ecuación 5).

Para modulaciones M-QAM, el cálculo de la probabilidad de error de símbolo en presencia de desvanecimiento está dada por:

$$P(s | \alpha) = \frac{2(\sqrt{M}-1)}{\sqrt{M}} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{3 \log_2 M}{2(M-1)} \frac{\alpha^2 E_b}{N_0}} \right)$$

(Ecuación 23)

Por tanto, utilizando la (Ecuación 23) y la (Ecuación 24) en la (Ecuación 25) la probabilidad de error de símbolo puede ser aproximada con:

$$\bar{P}_s \approx 2 \left(1 - \sqrt{\frac{\frac{3 \log_2 M}{2} \frac{\bar{\gamma}_b}{M-1}}{1 + \frac{3 \log_2 M}{2} \frac{\bar{\gamma}_b}{M-1}}} \right),$$

(Ecuación 24)

dónde $\bar{\gamma}_b = \alpha^2 \frac{E_b}{N_0}$ Si se utiliza codificación Gray, entonces la probabilidad

de error de bit puede ser aproximada como:

$$\bar{P}_b \approx \frac{\bar{P}_s}{\log_2 M}$$

(Ecuación 25)

2.3 Consideraciones para Implementación de Algoritmo de Simulación

El proceso de simulación requiere el uso de un transmisor para generar una señal modulada digitalmente a partir de una secuencia de bits aleatorios. Una vez creada esta señal, $x(n)$, es necesario realizar algunas mediciones a partir de esta y determinar la relación señal a ruido, $\frac{E_b}{N_0}$, se expresa habitualmente en decibeles. Si configuramos la SNR en m dB, entonces:

$$\frac{E_b}{N_0} = 10^{m/10}$$

(Ecuación 26)

es la SNR expresada como una proporción normal (numérica). Por lo tanto, el valor de $\frac{E_b}{N_0}$ es una cantidad adimensional.

Para determinar la energía por bit E_b , es necesario dividir la energía total por el número de bits contenidos en la secuencia transmitida. También podemos expresar la energía por bit como la potencia de señal promedio:

$$E_b = \frac{1}{N \cdot R_b} \sum_{n=1}^N x^2(n)$$

(Ecuación 27)

dónde N es el número total de muestras de la señal y R_b es la velocidad de transmisión en bits por segundo.

Para calcular N_0 , es necesario dividir E_b por la relación $\frac{E_b}{N_0}$ que se asume conocida, por lo tanto:

$$N_0 = E_b / E_b / N_0$$

(Ecuación 28)

La densidad espectral de potencia del ruido se encuentra expresada en W / Hz.

Para encontrar la varianza, σ_n^2 , o equivalentemente, la potencia promedio del ruido, es necesario conocer el ancho de banda de la señal recibida. Para una señal real, $x(n)$, con ancho de banda B , la potencia del ruido que afecta a esta señal es:

$$\sigma_n^2 = N_0 \cdot B [W]$$

(Ecuación 29)

Para efectos de simulación, se crea un vector de error “*err*” que contiene elementos diferentes de cero en las ubicaciones donde se encontraron errores entre los bits transmitidos y los bits recibidos. El número de errores en la transmisión es por lo tanto el número de elementos distintos de cero. Cada vez que ejecutamos una simulación de tasa de error de bits, transmitimos y recibimos un número fijo de bits, determinamos cuántos de los bits recibidos están en error, luego calculamos la tasa de error de bits como el número de errores de bits dividido por el número total de bits en la señal transmitida, es decir:

$$\text{BER} = \frac{t_e}{L(T_x)}$$

(Ecuación 30)

dónde t_e es el número total de bits recibidos con error. $L(T_x)$ es el vector de bits transmitidos.

En Matlab, es posible utilizar la función *biterr* para comparar dos conjuntos de datos y calcular el número de errores de bit y la tasa de error de bit. El proceso en cuestión se muestra en la Figura 9, dónde la función *biterr* compara representaciones binarias de elementos en un vector o matriz (*x*) con aquellos en un vector o matriz (*y*).

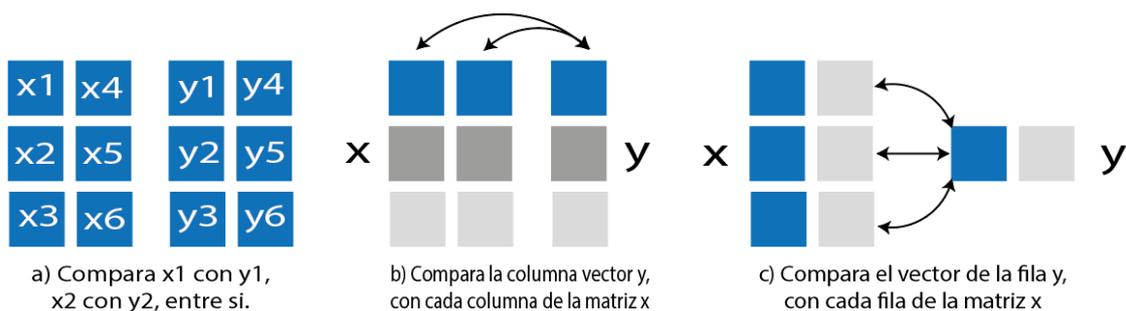


Figura 9. Sintaxis de comparación y funcionamiento de la función *biterr* en MATLAB.

Tomado de (Mathworks, 2019)

En el sistema simulado representamos las señales con una secuencia de números o muestras, que generalmente se almacenan en un vector o una matriz. Antes de poder realizar una prueba de tasa de error de bits, debemos comprender con precisión el significado de estas muestras y saber qué aspecto de la señal representa el valor de estas muestras, así también es necesario conocer el intervalo de tiempo entre muestras sucesivas.

Para simulaciones de comunicaciones, el valor numérico de la muestra representa la amplitud de la señal en un instante específico. Por lo tanto, esta amplitud es una medida de voltaje. El tiempo entre muestras sucesivas es, por definición, T_s que es la duración de un símbolo. En lugar de especificar T_s , especificamos habitualmente la tasa de transmisión, que es la inversa de T_s . Para efectos de simulación, normalizaremos la potencia de la señal transmitida, así como también la potencia del canal. Con este fin, se asume además una resistencia de exactamente un ohmio y esto nos permite prescindir totalmente de la noción de resistencia. Para nuestras simulaciones, representaremos una señal de tiempo continua como una matriz de muestras, cuyo valor numérico está en unidades de voltios, con referencia a una resistencia de un ohm.

3. CAPITULO III. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se analizará el desempeño en diferentes escenarios establecidos del sistema propuesto. Para esto consideraremos las modulaciones no cuadradas 8-QAM y 32-QAM. Para el análisis se consideró la presencia de desvanecimiento plano-lento de tipo Rayleigh. Para propósitos de simulación, se establecen umbrales de transmisión en función de la probabilidad de transmisión seleccionada (ver capítulo 2).

El análisis de desempeño del sistema se lo realiza en términos de la probabilidad de error de bit, para lo cual graficaremos curvas de la BER en función de la relación señal-ruido normalizada, es decir, E_b/N_o . Adicionalmente se comparará el desempeño del sistema oportunista con modulaciones no cuadradas con otros escenarios que usan modulaciones QAM cuadradas como

16-QAM y 64-QAM. En todos los casos existirá presencia de desvanecimiento, ruido blanco aditivo gaussiano y se usarán los mismos umbrales de transmisión a fin de asegurar una comparación justa.

3.1 Análisis de la BER considerando modulación 8-QAM no cuadrada

La Figura 10 presenta la probabilidad de error de bit media en función de la relación señal ruido considerando una modulación 8-QAM no cuadrada. Para este escenario se considera una probabilidad de transmisión $P_{tx} = 1/2$. En los resultados se observa que a medida que aumenta la SNR (E_b/N_0) la BER disminuye de una forma exponencial, lo que sugiere que los efectos del desvanecimiento han sido mitigados. Esto se puede aseverar debido a que generalmente, en la presencia de desvanecimiento, las curvas tienen un decaimiento lineal cuando la E_b/N_0 aumenta.

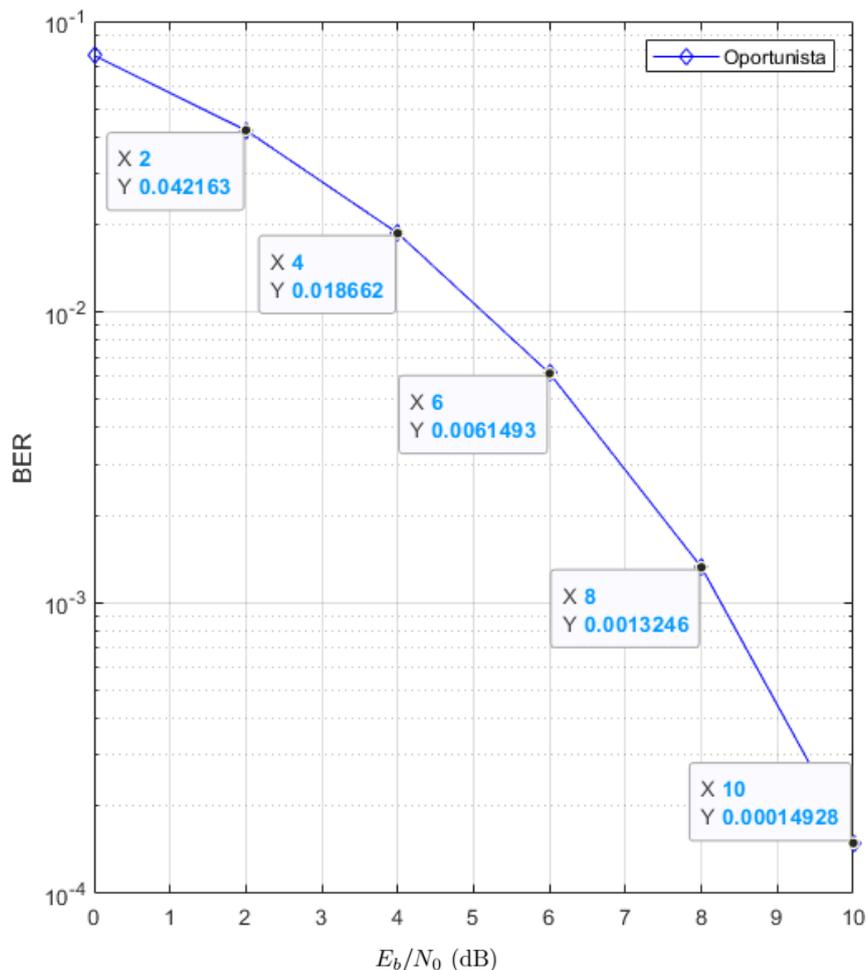


Figura 10. BER en función de la relación señal ruido media considerando modulación 8-QAM en un sistema oportunista que usa probabilidad de transmisión $P_{tx} = 1/2$.

Si comparamos un sistema con modulación 8-QAM con un sistema que utiliza otras modulaciones como por ejemplo la de modulación 4-QAM cuadrada, se puede evidenciar que la eficiencia espectral del sistema propuesto es mejor, debido a que la velocidad de transmisión de símbolos aumenta mientras se utiliza el mismo ancho de banda. No obstante, es probable que 8-QAM tenga una BER mayor. Esto se analizará a detalle en los siguientes capítulos.

Otro aspecto importante para mencionar es que el hecho de usar modulaciones no cuadradas como 8-QAM puede requerir una mayor capacidad de procesamiento del lado del receptor ya que al ser una constelación no cuadrada, su complejidad de detección en el mapeador puede ser mayor, principalmente porque los símbolos recibidos llegan de manera dispersa con mayor probabilidad de error. No obstante, es una complejidad práctica, es decir se puede implementar. La modulación 8-QAM es una modulación efectiva con una buena figura de mérito, es decir, la relación entre ancho de banda y potencia utilizada es mejor que para modulación cuadrada como 16-QAM.

3.2 Análisis de la BER considerando modulación 32-QAM no cuadrada

La Figura 11 muestra la BER en función de la relación E_b/N_o para un sistema de transmisión oportunista que usa modulación 32-QAM y una probabilidad de transmisión $P_{tx} = 1/2$. De manera semejante a lo observado con 8-QAM, se puede apreciar que la BER decae de forma exponencial cuando la relación E_b/N_o aumenta. Algunos valores de BER media se presentan en etiquetas dentro de la figura para una mejor observación de los resultados.

Al comparar la Figura 10 y la Figura 11, se observa que la modulación 32-QAM muestra valores más alto de tasas de error de bit. Esto se debe a la complejidad de detección de su constelación. Especialmente, un número mayor de símbolos

implica una mayor cantidad de regiones en la constelación y como una consecuencia una mayor probabilidad de cometer errores.

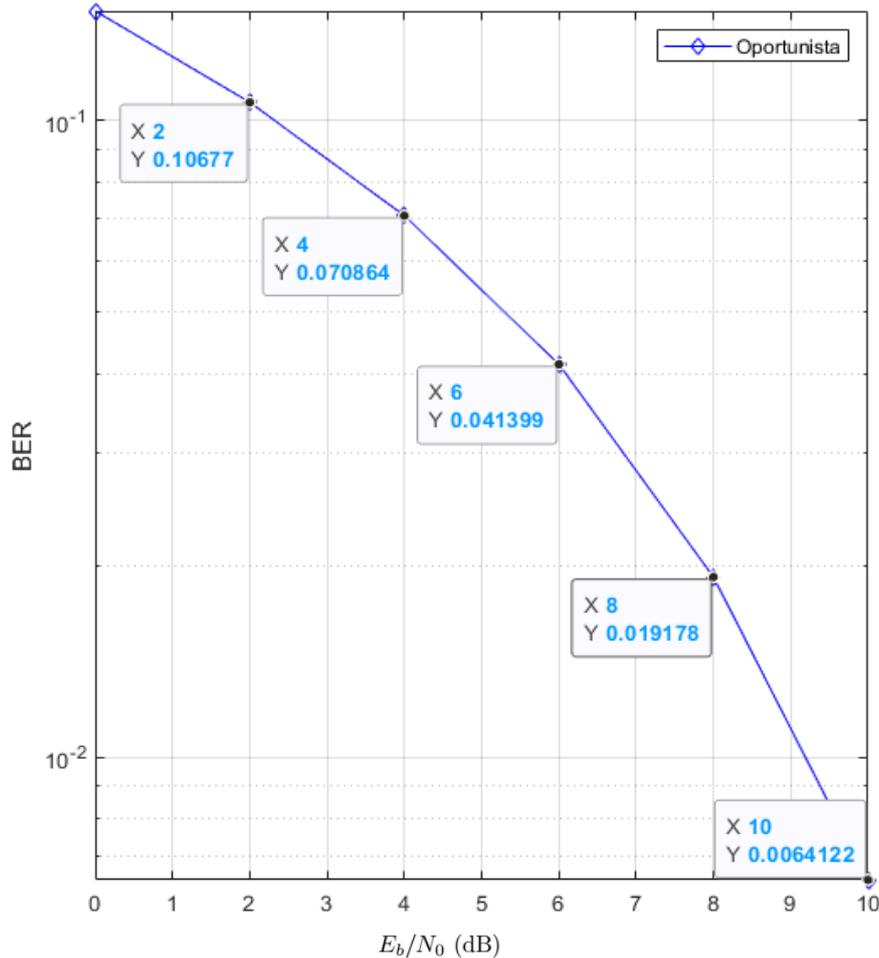


Figura 11. BER media en función de la relación señal ruido media considerando modulación 32-QAM en un sistema oportunista con probabilidad de transmisión $P_{tx} = 1/2$.

En 32-QAM, cada símbolo lleva encapsulado 5 bits, a diferencia de 8-QAM que lleva 3 bits. Por lo tanto 32-QAM garantiza una mayor tasa de transmisión, pero requiere algoritmos más robustos para decodificar estos conjuntos de símbolos complejos en el receptor. En conclusión, 32-QAM es mucho más complejo que 8-QAM, pero más eficiente en términos de uso del espectro.

3.3 Comparación de la BER de sistemas oportunistas que usan modulaciones QAM no cuadradas y modulaciones QAM cuadradas

En esta sección vamos a comparar los resultados previos con resultados obtenidos a partir de sistemas que utilizan modulaciones QAM cuadradas, específicamente, modulaciones 16-QAM y 64-QAM.

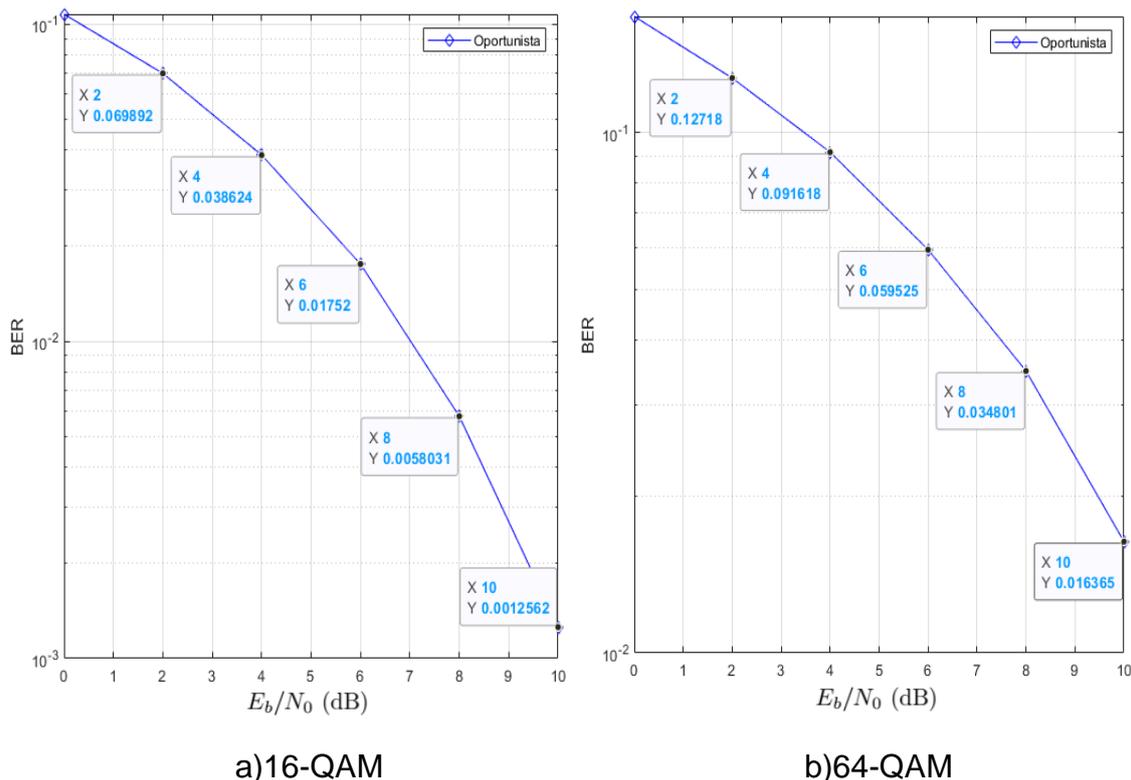


Figura 12. BER en función de la relación señal ruido media considerando modulaciones cuadradas 16-QAM y 64-QAM en un sistema con transmisión oportunista que considera probabilidad de transmisión $P_{tx} = 1/2$.

La Figura 12 presenta curvas de la BER para sistemas con transmisión oportunista que usan las modulaciones 16-QAM y 64-QAM respectivamente con probabilidad de transmisión umbral de transmisión $P_{tx} = 1/2$. Además, se asume que el mismo canal que en los escenarios anteriores. Para una mejor comparación de los resultados, algunos valores de la BER se muestran en la Tabla 2. Considerando estos valores se evidencia que para $E_b/N_0 = 2$ dB, la modulación no cuadrada 8-QAM presenta valores menores de BER en

comparación con la del sistema con modulación cuadrada 16-QAM. Esto se debe a que el orden de la modulación 8-QAM es menor al orden de la modulación 16-QAM, por lo tanto, existe una menor probabilidad de cometer errores al existir menos puntos en la constelación. Por otra parte, si tomamos como referencia $E_b/N_o = 10$ dB, entonces la BER de 8-QAM mejora en un 88% cuando lo comparamos con aquella de 16-QAM.

Tabla 2

Parámetros y valores comparativos en un sistema que emplea transmisión oportunista cuando la amplitud del desvanecimiento se encuentra por encima del umbral (u_2) = 1/2 y modulaciones no cuadradas 8-QAM y 32-QAM.

$BER_{\left(\frac{E_b}{N_o}\right)}$	8-QAM	16-QAM	32-QAM	64-QAM
$BER_{\left(\frac{E_b}{N_o}=2\right)}$	0,041742	0,069892	0,10736	0,12718
$BER_{\left(\frac{E_b}{N_o}=4\right)}$	0,01885	0,038624	0,070682	0,091618
$BER_{\left(\frac{E_b}{N_o}=6\right)}$	0,0062362	0,01752	0,040981	0,059525
$BER_{\left(\frac{E_b}{N_o}=8\right)}$	0,0012731	0,0058031	0,018584	0,034801
$BER_{\left(\frac{E_b}{N_o}=10\right)}$	0,00014556	0,0012562	0,0064842	0,016365

Por otra parte, para el caso de un sistema con transmisión oportunista y modulación no cuadrada 32-QAM, la simulación muestra valores menores de BER en comparación a la del sistema con modulación cuadrada 64-QAM. Esto se debe a que el orden de la modulación es menor. Como consecuencia el nivel de procesamiento es menos complejo y por lo tanto la BER media es un 43% menor para un escenario con un valor de $E_b/N_o = 10$ dB.

3.4 Diagramas de constelación para un sistema con transmisión oportunista que emplea modulaciones no cuadradas

La Figura 13 presenta las constelaciones de símbolos recibidos para un sistema con transmisión oportunista que usa una probabilidad de transmisión $P_{tx} = 1/2$ para modulaciones no cuadradas 8-QAM y 32-QAM. Para generar estas gráficas se utilizaron simulaciones generadas con la transmisión de 10.000 bits aleatorios, en donde se puede visualizar que, para el caso de la modulación 8-QAM la separación de los puntos de la constelación es mayor con relación a los puntos de la codificación gray de las constelaciones 32-QAM debido a su cercanía y tienen una menor tolerancia de ruido de fase debido a la menor separación entre los puntos de constelación adyacentes. Así también, se observa que en la constelación 32-QAM existe mayor probabilidad de que un bit llegue de manera errada debido a que la distancia entre símbolos, con relación a la de la modulación 8-QAM es menor.

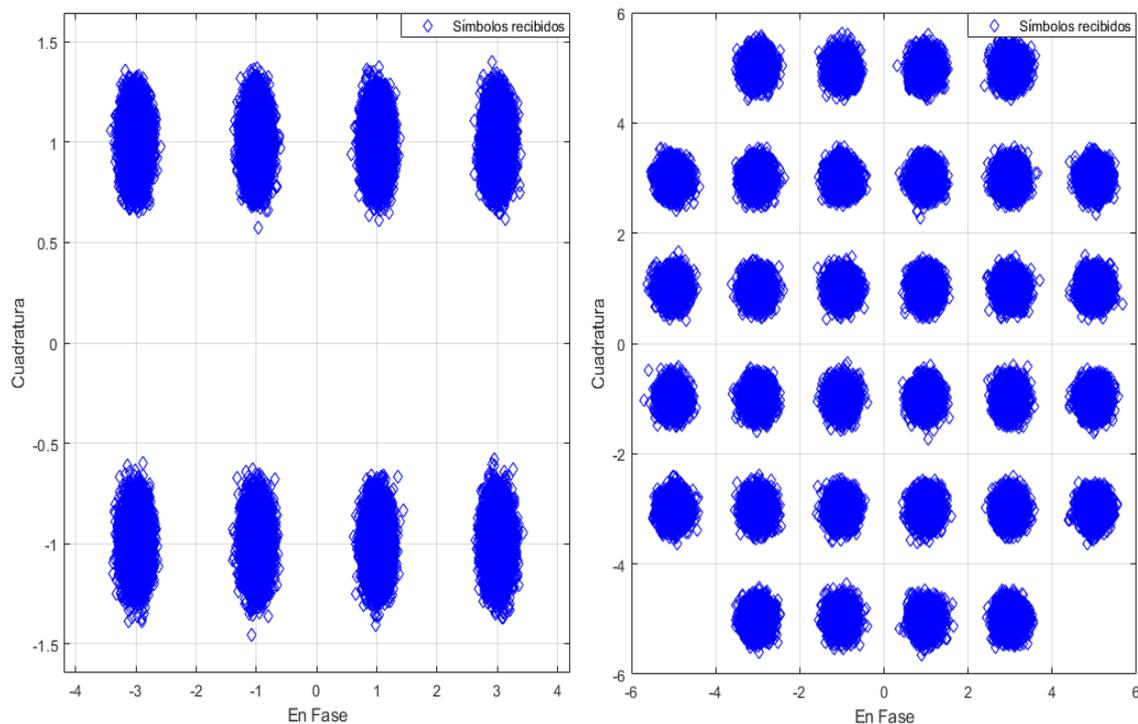


Figura 13. Diagramas de constelación mostrando los símbolos recibidos parametrizado por el orden de la modulación en un sistema con transmisión oportunista.

4. CAPITULO IV. COMPARACIÓN ENTRE SISTEMAS OPORTUNISTAS Y ORDINARIOS

En este capítulo compararemos el desempeño entre un sistema ordinario y un sistema oportunista considerando las modulaciones 8-QAM y 32-QAM. Como antes mencionado, se considera una canal con presencia de desvanecimiento plano-lento de tipo Rayleigh. Además, en todos los escenarios se considera que la probabilidad de transmisión $P_{tx} = 1/2$. Las simulaciones son realizadas usando el método de Monte Carlo. Con los resultados presentados podremos entender las diferencias entre los sistemas ordinarios y aquellos con transmisión oportunista considerando modulaciones no cuadradas antes mencionadas con anterioridad.

4.1 Comparación usando modulación no cuadrada 8-QAM

La Figura 14 presenta dos curvas de la probabilidad de error de bit en función de la relación señal-ruido (E_b/N_o). Específicamente, estas curvas son para un sistema con transmisión oportunista y otro de transmisión ordinaria. Además, para una mejor comprensión de los resultados, la tabla 3 muestra los valores obtenidos en las simulaciones en cuestión. En estos resultados se observa que BER cuando $E_b/N_o = 2$ dB la BER es igual a 0,041459 para un sistema con transmisión oportunista. Por otra parte, para un sistema con transmisión ordinaria la BER es igual a 0,12803 para el mismo valor de E_b/N_o . Como consecuencia, el sistema con transmisión oportunista elimina casi en su totalidad el efecto del desvanecimiento del canal y, por ende, su desempeño es mejor.

Tabla 3

Parámetros y valores comparativos de un sistema que emplea transmisión oportunista cuando la amplitud del desvanecimiento se encuentra por encima del umbral (u) = 1/2 y un sistema con transmisión ordinaria.

$BER_{\left(\frac{Eb}{N0}\right)}$	Modulación No Cuadrada	Transmisión Oportunista	Transmisión Ordinaria	Probabilidad transmisión (u)
$BER_{\left(\frac{Eb}{N0}=2\right)}$	8-QAM	0,041742	0,12839	1/2
$BER_{\left(\frac{Eb}{N0}=4\right)}$	8-QAM	0,01885	0,095149	1/2
$BER_{\left(\frac{Eb}{N0}=6\right)}$	8-QAM	0,0062362	0,067529	1/2
$BER_{\left(\frac{Eb}{N0}=8\right)}$	8-QAM	0,0012731	0,044516	1/2
$BER_{\left(\frac{Eb}{N0}=10\right)}$	8-QAM	0,00014556	0,032731	1/2

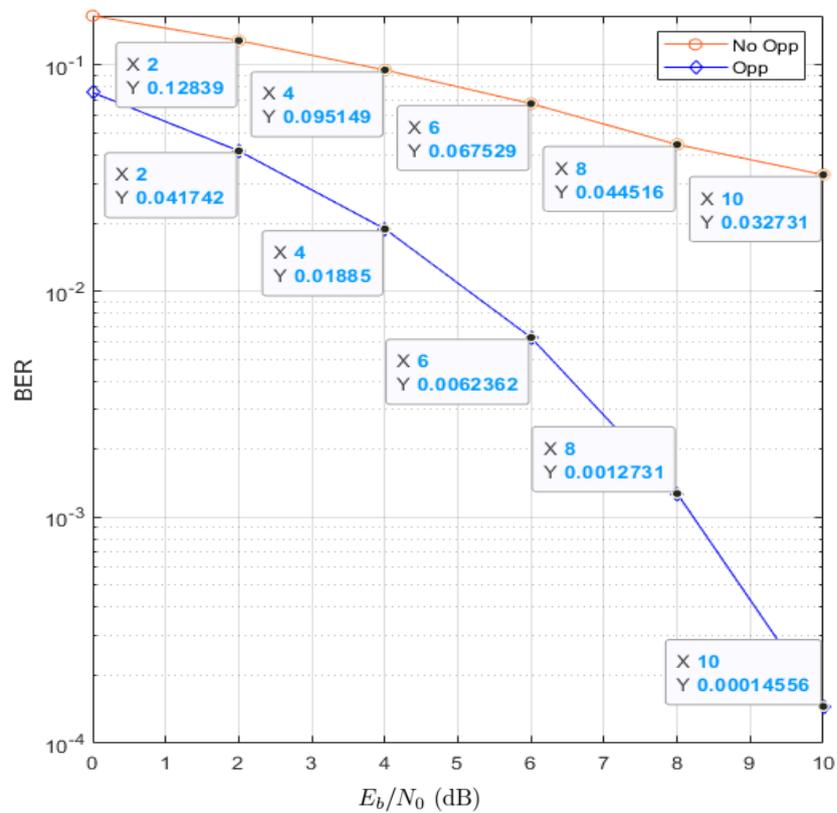


Figura 14. Probabilidad de error de bit en función de la relación señal ruido media (γ_b) considerando modulación 8-QAM parametrizado por el tipo de transmisión. Para transmisión oportunista $P_{tx} = 1/2$.

4.2 Comparación usando modulación no cuadrada 32-QAM

La Figura 15 muestra curvas obtenidas para la probabilidad de error de bit en función de la relación señal-ruido E_b/N_o para un sistema con transmisión oportunista de modulación no cuadrada 32-QAM y una probabilidad de transmisión $P_{tx} = 1/2$ para un sistema con transmisión ordinaria. Así, en la Tabla 4, se pueden observar los valores obtenidos en las simulaciones para una mejor comparación de los resultados.

En la Tabla 4 se muestra que para una relación señal-ruido $E_b/N_o = 10$ dB en un sistema con transmisión oportunista tiene una BER = 0,0064842, por otra parte, un sistema de transmisión ordinaria tiene una BER = 0,061099. Como resultado, el sistema con transmisión oportunista tiene un mejor desempeño frente al sistema de transmisión ordinaria. Esta mejora notable de desempeño es adjudicada al establecimiento de umbrales de transmisión, los cuales mitigan de manera considerable los efectos del desvanecimiento durante todo el proceso de transmisión. El desempeño de la modulación 32-QAM y la modulación 8-QAM para un mismo valor de E_b/N_o , se observa que cuando el orden de la modulación aumenta, entonces la probabilidad de que un bit llegue errado al receptor es más alta.

Tabla 4

Parámetros y valores comparativos un sistema que emplea transmisión oportunista cuando la amplitud del desvanecimiento se encuentra por encima del umbral (u) = 1/2 y un sistema con transmisión ordinaria.

$BER_{\left(\frac{Eb}{N0}\right)}$	Modulación No Cuadrada	Transmisión Oportunista	Transmisión Ordinaria	Probabilidad transmisión (u)
$BER_{\left(\frac{Eb}{N0}=2\right)}$	32-QAM	0,10736	0,19092	1/2
$BER_{\left(\frac{Eb}{N0}=4\right)}$	32-QAM	0,070682	0,15372	1/2
$BER_{\left(\frac{Eb}{N0}=6\right)}$	32-QAM	0,040981	0,11773	1/2
$BER_{\left(\frac{Eb}{N0}=8\right)}$	32-QAM	0,018584	0,087816	1/2
$BER_{\left(\frac{Eb}{N0}=10\right)}$	32-QAM	0,0064842	0,061099	1/2

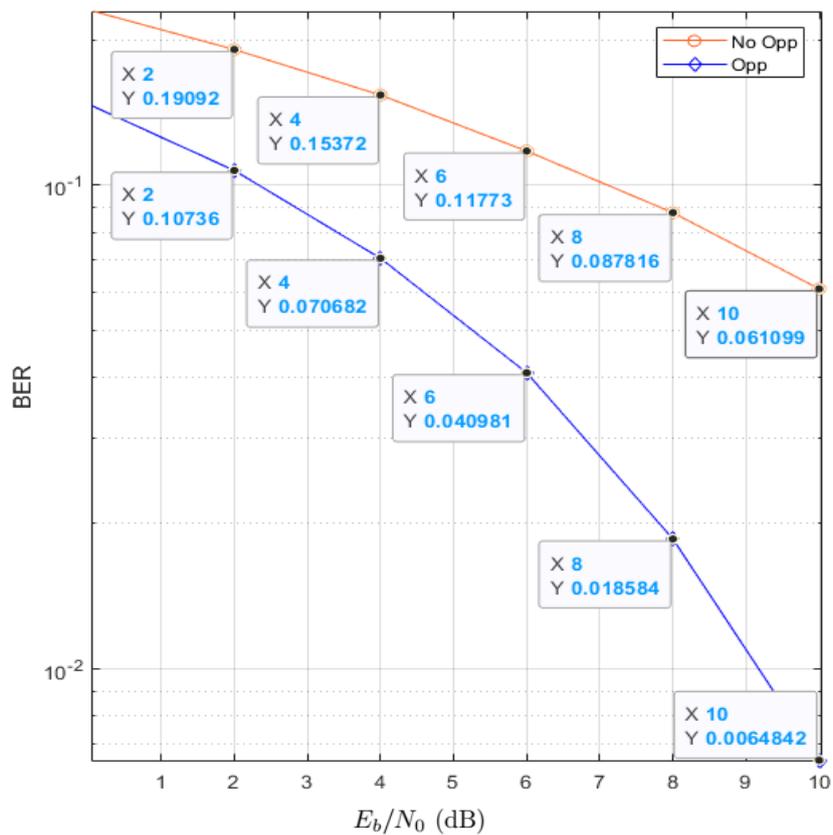


Figura 15. Probabilidad de error de bit en función de la relación señal ruido media (γ_b) considerando modulación 32-QAM parametrizado por el tipo de transmisión. Para transmisión oportunista $P_{tx} = 1/2$.

4.3 Diagrama de símbolos recibidos

La Figura 16 presenta dos diagramas de constelaciones. Específicamente para las constelaciones 8-QAM y 32-QAM respectivamente. En ambos casos se grafican símbolos recibidos considerando transmisión oportunista y ordinaria. Para el proceso de simulación generaron 10^4 bits aleatorios. Los diagramas de constelación muestran que, para ambas modulaciones, los símbolos de un sistema con transmisión oportunista tienen una mejor dispersión con respecto a la porción de los símbolos transmitidos. Por otra parte, el sistema con transmisión ordinaria los símbolos recibidos presentan una mayor dispersión lo que implica una mayor probabilidad de error.

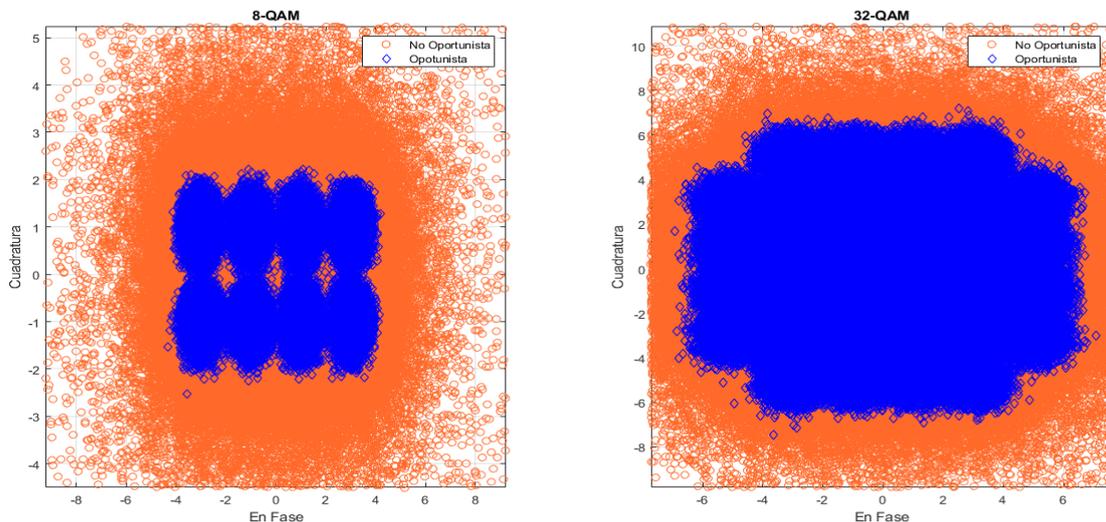


Figura 16. Diagramas de constelación de los símbolos recibidos en un sistema con transmisión oportunista y un sistema de transmisión ordinaria considerando $E_b/N_o = 10$ dB y parametrizado por el esquema de modulación.

Finalmente, la Figura 20 es semejante a la figura anterior, pero considera $E_b/N_o = 20$ dB. Como la SNR se incrementa, la dispersión de los símbolos recibidos disminuye y, por lo tanto, existe una menor BER. Obviamente, esta BER es menor cuando se usa transmisión oportunista.

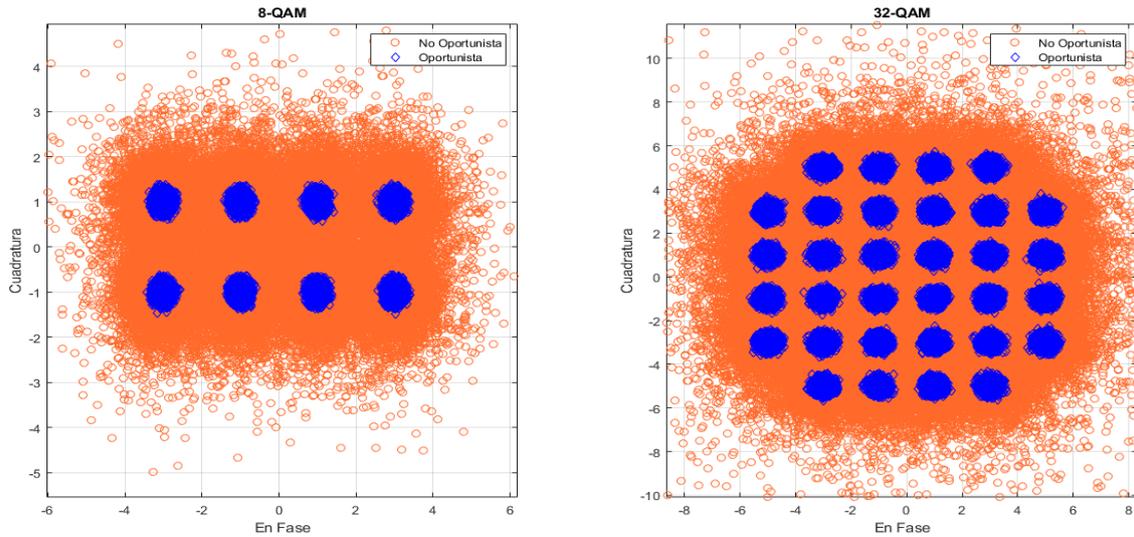


Figura 17. Diagramas de constelación de los símbolos recibidos en un sistema con transmisión oportunista y un sistema de transmisión ordinaria considerando $E_b/N_0 = 20$ dB y parametrizado por el esquema de modulación.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

En el presente trabajo se analizó el desempeño de un sistema con transmisión oportunista, un canal con desvaneciendo plano-lento de tipo Rayleigh y presencia de ruido aditivo blanco gaussiano. El sistema consideró modulaciones no cuadradas 8-QAM y 32-QAM. Para el análisis se estableció un mecanismo de transmisión considerando la probabilidad de transmisión $P_{tx} = 1/2$. Es decir, se diseñó el sistema considerando estadísticamente que el desvanecimiento es destructivo para la señal emitida.

El análisis del rendimiento del sistema con transmisión oportunista propuesto se basó en términos de la probabilidad de error de bit media para modulaciones no cuadradas 8-QAM y 32-QAM. Con base en los resultados se verificó que mientras el orden de la modulación aumenta, la probabilidad de error de bit es mayor y su procesamiento en el receptor (detección) es más complejo.

A partir de los resultados obtenidos en la simulación, realizamos una comparación entre un sistema con transmisión oportunista y un sistema de transmisión ordinaria, en donde fue posible evidenciar una mejora significativa del rendimiento en términos de la probabilidad de error de bit del sistema oportunista propuesto.

En base a los resultados obtenidos en la simulación de los sistemas propuestos entre los diferentes escenarios para modulaciones cuadradas y no cuadradas, se puede aseverar que el orden de la modulación afecta considerablemente a la BER cuando aumenta la constelación, sin embargo, aprovecha de manera eficiente el ancho de banda para modulaciones 32-QAM y 64-QAM.

5.2 Recomendaciones

En este proyecto se analizó el rendimiento de un sistema con transmisión oportunista para modulaciones no cuadradas 8-QAM y 32-QAM con presencia de desvanecimiento y ruido aditivo blanco gaussiano. Sin embargo, es recomendable que se realice un estudio de similares características con otro tipo de desvanecimiento como el de tipo Rice que por lo general se lo utiliza para transmisiones digitales de televisión y radio comunicación en las que existe línea de vista entre transmisor y receptor.

El sistema propuesto no ha sido aún evaluado en un sistema de transmisión múltiple por acceso de tiempo TDMA, pues su mecanismo es similar por las instancias de tiempo que utilizan. Por lo tanto, se recomienda evaluar la posibilidad de realizar una simulación similar en base a los parámetros expuestos en el presente proyecto.

El estudio realizado sobre el sistema propuesto no incluye un análisis de eficiencia espectral para modulaciones no cuadradas 8-QAM y 32-QAM. Así, sería interesante evaluar estas modulaciones con este parámetro y obtener una mejor descripción de desempeño del sistema.

Se recomienda realizar el proceso de simulación para diferentes tipos de modulaciones ya sean de tipo cuadradas o no cuadradas para obtener valores que permitan comparar las relaciones de señal a ruido y los diferentes escenarios de BER en base a estos parámetros calculados. Así también, es recomendable utilizar parámetros adicionales como interferencias co-canal y diversidad de antenas para simular un sistema MIM

REFERENCIAS

- Balwanth, S., Rishi, A., & Vinod, S. (2019). Performance Evaluation of QAM for Improvement of BER. *Wireless Personal Communication*, 1-11.
- Chaudhari, Q. (2018). *Additive White Gaussian Noise*. Recuperado el 23 de junio de 2019, de <https://wirelesspi.com/additive-white-gaussian-noise-awgn/>
- Chiani, M. (2005). *Influence of fading on the gaussian approximation for bpsk and qpsk with asynchronus cochannel interference*. Bologna: IEEE transaction on WirelessCommunications.
- Fuentes, M., Vargas, D., & Gómez-Baquero, D. (2016). Low-complexity demapping algorithm for two-dimensional non-uniform constellations. *Trans. Broadcast*.
- Hyun, K., & Yoon, D. (2005). *Bit metric generation for gray coded QAM signals*. Dongweon: Proc. Commun.
- Kyongkuk, C., Dongweon, Y., Kavehrad, M., & Wuncheol, J. (2001). BER analysis of arbitrary rectangular QAM. *IEEE Xplore*, 14-21.
- Lathi, B. (1970). *Random Signals and Communication Theory*. London: Intertext books.
- Linnartz, J. P. (2010). *Analog and Digital Transmission*. Recuperado el 01 de Julio 2019, de <http://www.wirelesscommunication.nl/reference/chaptr05/digimod/awgn.html>
- Loghin, N. (2016). Non-uniform constellations for ATSC 3.0. *Trans. Broadcast*.
- MacKay, D., & Neal, M. (1997). Near Shannon limit performance of low density parity check codes. *Electron. Lett*.
- Mathworks. (2019). *AWGN Channel*. Recuperado el 08 de julio 2019, de <https://la.mathworks.com/help/comm/ug/awgn-channel.html>
- Nour, C., & Douillard, C. (2008). Improving BICM performance of QAM constellations for broadcasting applications. *Turbo Codes Related Topics*.
- 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.

- Orozco, N., Carvajal, H., & Almeida, C. (2017). BER Analysis of Overloaded MC-CDMA Cellular System employing Sphere Decoder in Non-Ideal Sectorization Scenario. *Wireless and Mobile Computing*, 1-7.
- Orozco, N., Carvajal, H., & Celso, A. (2019). Performance Evaluation of Encoded Opportunistic Transmission Schemes. *IEEE Access*, 1-14.
- Ozaki, T. I. (2015). *United States Patente nº US6201841B1*.
- Papoulis, A. (1991). *Probability, Random Variables, and Stochastic Processes*. Boston: McGraw-Hill.
- Pishro-Nik, H. (2005). *Introduction to Probability Density Function*. Recuperado el 11 de julio 2019, de https://www.probabilitycourse.com/chapter4/4_1_1_pdf.php
- Vijay, K. (2006). *State of the art and future trends in wireless communications*. Columbia: IEEE Computer Society Washington.
- Vitthaladevuni, P., & Alouini, M. (2001). BER computation of generalized QAM constellations. *IEEE Xplore*, 3-14.
- Zamora, I. (2009). Probabilidad de error y BER en señales banda base. *Detección e introducción a la teoría de estimación* (pág. 30). Lima: Universidad de Nacional de Zamora.

ANEXOS

ANEXO 1

```
function BER = oportunistaQAM( varargin )

    % Valores por defecto
    M = 8;
    opp = false;
    EbNoDBVec = 0:2:10;
    nIter = 1e4;
    dataSize = 1e3;
    error = Inf;
    showBar = true;
    fading = true;

    [M, opp, EbNoDBVec, nIter, dataSize, error, showBar, fading] =
validarEntradas(...

M, opp, EbNoDBVec, nIter, dataSize, error, showBar, fading, varargin{:});

    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

    % Parâmetros estabelecidos
    mediana = sqrt( log(5) );
    desv_pad_fading = 1 / sqrt(5);

    for j = 1:nEbNo

        %Parâmetros calculados
        EbNo = 10 ^ ( EbNoDBVec(j) / 10 );
        EsNo = log2(M) * EbNo;
        desv_pad_ruido = sqrt( 1 / 2 / EsNo );
        e_media = sqrt( 2*(M-1)/3 );

        errCont = 0; nSym = 0;
        for i = 1:nIter

            %Feedback
            if fading
                fading = desv_pad_fading * norm( randn(1,2) );
            else
                fading = 1;
            end

            if fading >= mediana || ~opp

                % Transmisor
                dataIn = randi( [0 M-1], dataSize, 1 );
                txSignal = qammod( dataIn, M ) / e_media;
```

```

        % Canal
        %AWGN
        noise = desv_pad_ruido * randn(dataSize,2) * [ 1; 1i
];

        %Fading
        noiseSignal = fading*txSignal + noise;

        % Receptor
        rxSignal = e_media * noiseSignal / fading;
        dataOut = qamdemod( rxSignal, M );

        % errores
        errCont = errCont + biterr( dataIn, dataOut );
        nSym = nSym + 1;

        if showBar % barra de progreso
            bar = updateBar( bar, (j-1)/nEbNo + i/nIter/nEbNo
);

            end

            if errCont >= error(j)*dataSize
                break;
            end
        end
    end

    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

function [M,opp,EbNoDBVec,nIter,dataSize,error,showBar,fading] =
validarEntradas(...
    M,opp,EbNoDBVec,nIter,dataSize,error,showBar,fading,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, 'nIter', nIter, @(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;
nIter = p.Results.nIter;
dataSize = p.Results.dataSize;
error = p.Results.error;
showBar = p.Results.showBar;
fadding = p.Results.fadding;

if fadding == false
    opp = false;
end

end

function bar = updateBar( bar, p )
    txt = sprintf( "%.2f[%%]", 100*p );
    try
        waitbar( p, bar, txt );
    catch
        bar = waitbar( p, txt );
    end
end
end

```

ANEXO 2

```

EbNoDBVec = 0:2:10;
nIter = 1e4;

subplot(121)
BER = oportunistaqam( 8, false, EbNoDBVec, 'fadding', false, 'nIter',
nIter );
semilogy( EbNoDBVec, BER, '-s' )
hold on
BER = oportunistaqam( 8, false, EbNoDBVec, 'fadding', true, 'nIter',
nIter );
semilogy( EbNoDBVec, BER, '-o' )
BER = oportunistaqam(8, true, EbNoDBVec, 'fadding', true, 'nIter',
nIter );
semilogy( EbNoDBVec, BER, '-d' )
hold off
grid on
legend( 'No Fadding', 'No Oportunista' , 'Oportunista' )
xlabel('Eb/No (dB) ')
ylabel('BER')
title('8-QAM')

subplot(122)
BER = oportunistaqam( 32, false, EbNoDBVec, 'fadding', false, 'nIter',
nIter );
semilogy( EbNoDBVec, BER, '-s' )
hold on

```

```
BER = oportunistaQAM( 32, false, EbNoDBVec, 'fadding', true, 'nIter',  
nIter );  
semilogy( EbNoDBVec, BER, '-o' )  
BER = oportunistaQAM( 32, true, EbNoDBVec, 'fadding', true, 'nIter',  
nIter );  
semilogy( EbNoDBVec, BER, '-d' )  
hold off  
grid on  
legend( 'No Fadding', 'No Oportunista' , 'Oportunista' )  
xlabel( 'Eb/No (dB)' )  
ylabel( 'BER' )  
title( '32-QAM' )
```

